

2015

Instituto Politécnico de Coimbra

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE COIMBRA

# **Desenvolvimento de uma unidade de refrigeração com apoio térmico**

**MESTRADO EM PROCESSOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS**

**AUTOR** | Helena Isabel Tavares Correia

**ORIENTADOR** | Doutor Luís Miguel Moura Neves de Castro  
| Doutora Maria Nazaré Coelho Pinheiro

Coimbra, maio 2015





Departamento  
de Engenharia Química e Biológica

---

## **Desenvolvimento de uma unidade de refrigeração com apoio térmico**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Processos Químico e Biológicos (2012/2014)

**Autor**

**Helena Isabel Tavares Correia**

**Orientadores**

**Doutor Luís Miguel Moura Neves de Castro**

**Doutora Maria Nazaré Coelho Pinheiro**

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra, Maio, 2015**



*“Talvez não tenha conseguido fazer melhor, mas lutei para que o  
melhor fosse feito. não sou o que deveria ser, mas graças a Deus  
não sou o que era antes”  
Marthin Luther King*



## **Agradecimentos**

Uma tese de mestrado é uma jornada solitária para quem a realiza, mas apesar disso pude contar com o contributo de várias pessoas para a concretização deste trabalho.

Ao Doutor Luís Miguel Moura Neves de Castro e a Doutora Maria Nazaré Coelho Pinheiro, meus orientadores, agradeço a paciência, o apoio, a disponibilidade e a partilha de conhecimento no decorrer deste trabalho.

Tenho também de agradecer a Engenheira Laura Maria Teixeira Santos e a Martine Marques da Costa pela disponibilidade que tiveram para me ajudar a resolver alguns dos problemas técnicos no decorrer deste trabalho.

A todos os meus colegas de mestrado agradeço, também, pela companhia e pela camaradagem, em particular a Brigitte de Sousa Lagoa e ao Hugo Abreu.

A todos os meus amigos próximos um muito obrigada, pelos momentos de descontração que me proporcionaram no decorrer desta jornada, principalmente a Catarina Matos e a Diana Ferreira.

Por último, agradeço a minha família o apoio incondicional, a motivação e o carinho ao longo destes anos, por me proporcionarem a realização desta etapa, mas de um modo indireto, particularmente a minha Mãe. Pai e Mila. Não podia deixar de mencionar as pessoas que não me conseguiram ver concluir esta etapa, mas que sem eles não tinha sido possível, São, Paixão e TiLídia.

A todos aqueles que me ajudaram a tornar-me quem sou, só me resta não vos desiludir. Muito obrigada....





## RESUMO

O objetivo deste estudo foi desenvolver e determinar os coeficientes de desempenho de uma unidade piloto de refrigeração por absorção, com a finalidade de se verificar a sua viabilidade em zonas de elevada exposição solar, sem acesso ou com acesso deficiente, à rede de energia elétrica.

A solução absorvente utilizada, nesta unidade, foi a solução de cloreto de lítio, pois ao realizar-se um levantamento bibliográfico foi a que mostrou ter mais vantagens comparativamente às outras soluções utilizadas em unidade de refrigeração semelhantes.

A unidade piloto utilizada para o processo de evaporação era constituída por duas colunas, uma continha a solução de cloreto de lítio (absorvente) e outra o refrigerante (água), a estas duas colunas foi acoplada uma bomba de ar, que favorecia a transferência de massa de água evaporada da coluna de água, para a coluna de solução de cloreto de lítio.

Os ensaios laboratoriais consistiam em dois processo, o processo de evaporação e o processo de regeneração. No processo de evaporação era determinada a quantidade calor que a unidade conseguia remover por unidade de tempo. Foram utilizadas duas bombas de ar com diferentes caudais, a bomba B1, com caudal de  $402 \pm 6,2$  L/min e a bomba B2, com caudal de  $358 \pm 8,6$  L/min, verificando-se que a diferença de caudais volumétricos do ar originava diferentes resultados para as mesmas condições experimentais, constatando-se assim que o caudal volumétrico do ar tinha um grande contributo na transferência de massa do processo.

No processo de regeneração procedia-se à concentração da solução, a uma temperatura, aproximadamente, de  $96\text{ }^{\circ}\text{C}$ , determinando-se a taxa de calor por unidade de tempo. Verificou-se que o caudal de vaporização da água no processo de regeneração da solução de cloreto de lítio diminui significativamente à medida que a concentração da solução absorvente aumenta, para concentrações superiores a cerca de  $6\text{ mol/L}$ , o caudal de evaporação era inferior a  $0,2\text{ mL/min}$  tendendo lentamente para um valor próximo de zero.

Para a determinação dos parâmetros, acima mencionados, eram monitorizados o tempo e a quantidade de água evaporada no processo quer de evaporação quer de regeneração, do mesmo modo como a concentração da solução de cloreto de lítio. Os parâmetros mais importantes no processo de evaporação eram a temperatura do banho termostatzado e a concentração da solução absorvente, assim como a temperatura, ambiente que se verificou que poderia influenciar os resultados do ensaio. Verificou-se que ao aumentar a temperatura do banho termostatzado a transferência de calor era mais significativa, sendo transferida uma maior quantidade de água transferida, fixando a temperatura do banho termostatzado e aumentando a concentrações da solução absorvente o processo tornava-se, ainda, mais eficiente.

Os coeficientes de desempenho obtidos, neste estudo, são inferiores ao que se obtém numa unidade de refrigeração por absorção comercial, mas tem de se ter em conta que este tipo de unidades comerciais operam sob vácuo e a utilizada neste estudo encontrava-se a operar a pressão atmosférica.

Os valores de COP médios obtidos para a temperatura de 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C e 50 °C foram  $0,056 \pm 0,021$ ,  $0,11 \pm 0,028$ ,  $0,13 \pm 0,026$ ,  $0,32 \pm 0,071$  e  $0,28 \pm 0,054$ , respetivamente, verificando-se que o coeficiente de desempenho diminui com a diminuição da temperatura do banho termostaticado, já que o calor de regeneração da solução e a potência das bombas, se mantiveram, praticamente, constante

Realizou-se também o dimensionamento da unidade, ao determinar-se o número de colunas necessárias para refrigerar uma divisão com três ocupantes. Para este calculou-se a taxa de calor removida no período estacionário e no período máximo de cada ensaio às diferentes temperaturas.

Caso a unidade operasse sempre no seu ponto máximo, ou seja, se estivesse continuamente a remover a quantidade de calor máximo possível para a temperatura de 30 °C, de 35 °, de 40 °C, de 45 °C e de 50 °, seriam necessários 37,53, 107,45, 69,71, 13,34 e 21, 83 tubos, respetivamente, aumentando consideravelmente em relação aos valores calculados para a taxa de calor máxima.

Pode-se assim concluir que a unidade em estudo, mesmo que muito rudimentar apresenta já valores de COP significativos, apesar de muito aquém dos valores apresentados pelas unidades comerciais, sendo assim seria de toda vantajosa uma otimização da unidade.

Palavras-chave:

- Absorção
- Evaporação
- Regeneração
- Cloreto de lítio

## ABSTRACT

The purpose of this study was to develop and determine the coefficients of performance of a cooling pilot plant by absorption in order to verify its viability in high sun exposure areas without access or with poor access to the power network.

The absorbent solution used, this unit was the lithium chloride solution because according to the literature it was the one that proved to have more advantages compared to other solutions used in similar refrigeration unit.

The pilot plant used for the process of evaporation was constituted by two columns, one containing the solution of lithium chloride (absorbent) and the other the refrigerant/ a coolant (water). To these two columns it has been coupled an air pump which favored the mass transfer of evaporated water from the water column to the column with lithium chloride solution.

The laboratory test consisted of two processes: the evaporation process and the regeneration process. In the evaporation process it was determined the heat quantity that the unit could remove per unit time. It was used two air pumps with different flow rates, the B1 pump with a flow rate of  $402 \pm 6.2$  L / min and the B2 pump with a flow rate of  $358 \pm 8.6$  L / min, verifying that the difference of volumetric flow rate of air originated different results for the same experimental conditions, which allowed evidencing that the volumetric air flow rate had a great contribution to the mass transfer process.

In the regeneration process proceeded up to the concentration of the solution at a temperature of approximately  $96^{\circ}\text{C}$  by determining the heat rate per unit time. It was found that the water vaporization rate to the regeneration process of the lithium chloride solution decreases significantly as the concentration of the absorbent solution increases. For concentrations above about 6 mol / L the evaporation flow rate was less than 0,2 mL / min tending slowly to a value close to zero. To determine the parameters above mentioned, it was monitored the time and the amount of evaporated water evaporated in either the evaporation or in the regeneration process in the same manner as the concentration of the lithium chloride solution. The most important parameters in the evaporation process were the temperature of the thermostated bath and the concentration of the absorbent solution as well as the temperature setting which could influence the test results. It was found that by increasing the temperature of the thermostated bath the heat transfer was more significant, being transferred a greater amount of water by setting the temperature of the thermostated bath and increasing the concentration of the absorbent solution the process became even more efficient.

The performance coefficients obtained in this study are lower than those obtained in commercial refrigeration unit by absorption, but it has to take into account that this type of commercial units operate under vacuum and the unit used in this study was operating under atmospheric pressure.

The average COP values obtained for the temperature 30 ° C, 35 ° C, 40 ° C, 45 ° C and 50 ° C were  $0,056 \pm 0,021$ ;  $0,11 \pm 0,028$ ;  $0,13 \pm 0,026$ ;  $0,32 \pm 0,071$  and  $0,054 \pm 0,28$ , respectively, verifying that the coefficient of performance decreases with decreasing temperature of the thermostated bath, since the heat of the regeneration solution and the power of the pumps were maintained practically constant.

It was also carried out the dimensioning of the unit, when determining the number of columns needed to cool a room with three occupants. To this it was calculated the rate of heat removed in the steady period and a maximum period of each assay to different temperatures.

If the unit always operate at its maximum, i.e. if continuously remove the maximum amount of the heat possible to a temperature of 30 ° C, 35 °, 40 ° C, 45 ° C and 50 ° it would take 37,53, 107,45, 69,71, 13,34 and 21, 83 tubes, respectively, increasing considerably compared to the values calculated for maximum heat rate.

It can be concluded that the unit under consideration, even if very rudimentary already has significant COP values, although far short of the figures presented by the business units, so would all advantageous optimization of the unit.

Keywords:

- Absorption
- Evaporation
- Regeneration
- Lithium Chloride

## Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento .....	1
1.2.	Breve Descrição da Evolução Histórica dos Sistemas de Refrigeração .....	4
1.3.	Sistemas de refrigeração .....	8
1.3.1.	Sistema de refrigeração por compressão de vapor .....	9
1.3.2.	Sistema de refrigeração por adsorção .....	10
1.3.3.	Sistema de refrigeração por absorção .....	12
1.3.4.	Sistemas de refrigeração com apoio solar .....	16
1.4.	Estado de arte dos Sistemas de Refrigeração por Absorção .....	19
2.	Materiais e métodos .....	29
2.1.	Unidade de refrigeração .....	31
2.1.1.	Processo de evaporação .....	33
2.1.2.	Unidade de regeneração .....	35
2.1.3.	Coeficiente de desempenho .....	37
2.2.	Quantificação da concentração da solução absorvente .....	38
3.	Resultados e Discussão .....	39
3.1.	Resultados do processo de evaporação .....	41
3.2.	Resultados do processo de regeneração .....	59
4.	<i>Scale up</i> .....	67
5.	Conclusão e Perspetivas Futuras .....	75
	Referências Bibliográficas .....	77
	Anexos .....	81
A.	Tabelas dos dados experimentais .....	81
B.	Protocolo Método de Mohr .....	155
i.	Preparação da solução de Nitrato de prata .....	155
ii.	Preparação da solução de cromato de potássio .....	156
iii.	Método de Mohr .....	156



## Índice de figuras

Figura 1.3.1 – Representação esquemática do sistema de refrigeração ideal por compressão mecânica (adaptado de (Cengel, et al., 2001).	9
Figura 1.3.2 – Diagrama pressão (p) vs entalpia (h) do sistema de refrigeração ideal por compressão a vapor (Flores, et al., 2014).	10
Figura 1.3.3 - Processo referente ao efeito de refrigeração; b) processo referente ao efeito de regeneração do absorvente (fornecimento de calor, qh, ao gerador que contém a solução absorvente) (adaptado de Srihirin, et al., 2001).	13
Figura 1.3.4 - Esquema de uma unidade de absorção básica (adaptado de (Flores, et al., 2014).	14
Figura 1.4.1 – Ilustração da unidade real da unidade <i>Climatwell</i> (adaptado de Borge et al., 2011).	27
Figura 2.1.1 – a) Esquema do processo de evaporação da unidade de refrigeração; b) Processo de evaporação da unidade de refrigeração de absorção com a bomba de circulação.	34
Figura 2.1.2 – Ilustração do processo de regeneração da solução aquosa de cloreto de lítio.	36
Figura 3.1.1 - Evolução do volume de água evaporada em função do tempo para a experiência realizada à temperatura de 35 °C.	43
Figura 3.1.2 - Variação da concentração da solução de cloreto de lítio em função do volume de água evaporada a temperatura de ensaio 35 °C.	44
Figura 3.1.3 - Representação gráfica do volume de água evaporada em função do tempo para a temperatura de ensaio de 35 °C, utilizando-se a bomba B1 ( $402 \pm 6,2$ L/min) e a bomba B2 ( $358 \pm 8,6$ L/min).	45
Figura 3.1.4 - Variação do volume de água evaporada em função do tempo no período estacionário, para a experiência realizada à temperatura de 35 °C, utilizando-se a bomba B1 ( $402 \pm 6,2$ l/min) e a bomba B2 ( $358 \pm 8,6$ L/min).	46
Figura 3.1.5 - Representação gráfica do caudal vs concentração para à temperatura ambiente de 35 °C, utilizando-se a bomba B1 ( $402 \pm 6,2$ L/min) e a bomba B2 ( $358 \pm 8,6$ L/min).	49
Figura 3.1.6 – Variação do volume de água evaporada em função do tempo.	51
Figura 3.1.7 - Variação do volume de água evaporada em função do tempo no período estacionário.	54
Figura 3.1.8 - Evolução da concentração da solução de cloreto de lítio em função do volume de água evaporada.	56
Figura 3.1.9 - Variação do caudal instantâneo de evaporação de água em função da concentração da solução de cloreto de lítio para a temperatura de 30 °C no banho termostaticado.	58
Figura 3.2.1 -Evolução da razão entre o volume num dado instante e o volume da solução absorvente em função do tempo no processo de regeneração da solução absorvente	62
Figura 3.2.2 – Evolução do caudal médio de água evaporada em função da concentração da solução absorvente no processo de regeneração	63

Figura 3.2.3 - Variação do valor do coeficiente de desempenho (COP) com a concentração da solução absorvente	65
Figura 4.1 - Representação esquemática do interior da parede.	70
Figura 4.2- Representação esquemática do interior do telhado.	70



## Índice de tabelas

Tabela 1.3.1 – Vantagens e desvantagens do sistema de refrigeração por absorção (Carvalho, 2010; Kim, et al., 2008; Rosato, et al., 2013).	16
Tabela 1.3.2 – Principais características dos sistemas de refrigeração solares térmicos adaptado de (Ferrari, 2005).	17
Tabela 2.1.1 - Parâmetros para a determinação da variação da entalpia de diluição da solução de cloreto de lítio.	37
Tabela 2.2.1 – informação referente à titulação das soluções de cloreto de lítio com nitrato de prata com uma concentração de 0,1 m, utilizando o método de Mohr.	38
Tabela 3.1.1 – Resultados obtidos no processo de evaporação, a diferentes temperaturas, em que se utilizou duas bombas de circulação de ar com diferentes caudais, B1 com um caudal de $402 \pm 6,2$ L/min e B2 com um caudal de $358 \pm 8,6$ L/min.	42
Tabela 3.1.2 - Valores da taxa de calor máximo, média em toda a experiência e média no período estacionário dos ensaios realizados à temperatura de 35 °C.	48
Tabela 3.1.3 – Valores do calor transferido máximo, médio global e médio no período estacionário para os ensaios efetuados.	55
Tabela 3.2.1 - Resultados obtidos no processo de regeneração à temperatura de 96 °C.	61
Tabela 3.2.2 - Dados das taxas de calor do processo de evaporação e de regeneração para os ensaios efetuados, e consequente coeficiente de desempenho.	64
Tabela 4.1 – Características principais da divisão a refrigerar.	69
Tabela 4.2 - Valores dos coeficientes de transferência de calor interno e externo e do coeficiente global de transferência de calor para as janelas (Stoecker e Jones, 1958).	69
Tabela 4.3 - Valores de condutividade térmica e espessura dos materiais que constituem as paredes e telhado (Cengel, 2002).	71
Tabela 4.4 - Valores das resistências térmicas de cada constituinte da parede e resistência total da mesma.	71
Tabela 4.5 - Valores das resistências térmicas de cada constituinte do telhado e resistência total do mesmo.	71
Tabela 4.6 – Valores obtidos para as parcelas de calor perdido e gerado na divisão em estudo.	72
Tabela 4.7 – Valores das taxas de calor a remover da sala calculada e considerada para efeito de dimensionamento da unidade e caudal de água evaporado que será necessário.	73
Tabela 4.8 – Caudal volumétrico e taxas de calor máxima e no período estacionário que permitem determinar o número de colunas de evaporação necessárias para manter a sala refrigerada.	73
Tabela A.1 – Resultados obtido na primeira fase de ensaio, em que só se estudou o processo de evaporação à temperatura de 50 °C.	81
Tabela A.2 – condições usadas na experiência 1, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 5,28 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de $402 \pm 6,2$ L/min.	82
Tabela A.3 – Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 1, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 5,28 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de $402 \pm 6,2$ L/min.	83

Tabela A.4 – Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 1, com uma concentração de 5.28 M e para uma temperatura de 50 °C em que se utilizou com um caudal de $402 \pm 6,2$ L/min..	83
Tabela A.5 – Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 1, com uma concentração de 5.28 M e para uma temperatura de 50 °C em que se utilizou com um caudal de $402 \pm 6,2$ L/min.	84
Tabela A.6 – Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 1, com uma concentração de 5.28 M e para uma temperatura de 50°C em que se utilizou com um caudal de $402 \pm 6,2$ L/min.	84
Tabela A.7 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio em que se utilizou com um caudal de $402 \pm 6,2$ L/min.	84
Tabela A.8 - Condições usadas na experiência 2, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,88 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	85
Tabela A.9 – Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 2, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,88 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	85
Tabela A.10 – Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 2, com uma concentração de 11,88 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	86
Tabela A.11– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 2, com uma concentração de 11,88 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	86
Tabela A.12 – Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 2, com uma concentração de 11,88 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	86
Tabela A.13 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	86
Tabela A.14 - condições usadas na experiência 3, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,18 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 45 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	88
Tabela A.15 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 3, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,18na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 45 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	89
Tabela A.16– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 3, com uma concentração de 11,18 M e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	89
Tabela A.17– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 3, com uma concentração de 11,18 M e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	90
Tabela A.18– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 3, com uma concentração de 11,18 m e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	90

Tabela A.19 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	90
Tabela A.20 - condições usadas na experiência 4, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,04 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	91
Tabela A.21 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 4, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,04 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min..	92
Tabela A.22 – valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 4, com uma concentração de 12,04 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	92
Tabela A.23 – dados experimentais do processo de regeneração da experiência 4, com uma concentração de 12,04 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	93
Tabela A.24 – valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 4, com uma concentração de 12,04 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	93
Tabela A.25 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	93
Tabela A.26 - condições usadas na experiência 5, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 16,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	94
Tabela A.27 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 5, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	94
Tabela A.28 – valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 5, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	95
Tabela A.29– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 5, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	95
Tabela A.30– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 5, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 30°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	95
Tabela A.31 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	96
Tabela A.32 - condições usadas na experiência 6, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 45 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	97
Tabela A.33 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 6, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 45°C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	98

Tabela A.34– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 6, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	98
Tabela A.35– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 6, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	98
Tabela A.36– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 6, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	99
Tabela A.37 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	99
Tabela A.38 - condições usadas na experiência 7, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 8,24 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	100
Tabela A.39 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 7, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 8,24 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	100
Tabela A.40– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 7, com uma concentração de 8,24 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	101
Tabela A.41– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 7, com uma concentração de 8,24 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	101
Tabela A.42– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 7, com uma concentração de 8,24 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	101
Tabela A.43 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	101
Tabela A.44 - condições usadas na experiência 8, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 10,43 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	103
Tabela A.45 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 8, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 10,43 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	104
Tabela A.46– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 8, com uma concentração de 10,45 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	104
Tabela A.47– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 8, com uma concentração de 10,45 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	105
Tabela A.48– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 8, com uma concentração de 10,45 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	105

Tabela A.49 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	105
Tabela A.50 - condições usadas na experiência 9, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	106
Tabela A.51 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 9, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	107
Tabela A.52– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 9, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de $40^{\circ}\text{C}$ utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $400 \pm 7,4$ L/min.	107
Tabela A.53– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 9, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de $40^{\circ}\text{C}$ utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	107
Tabela A.54– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 9, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	109
Tabela A.55 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	109
Tabela A.56 - condições usadas na experiência 10, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,96 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	110
Tabela A.57 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 10, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,96 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	111
Tabela A.58– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 10, com uma concentração de 12,96 M e para uma temperatura de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	111
Tabela A.59– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 10, com uma concentração de 12,96 M e para uma temperatura de $35^{\circ}\text{C}$ utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	111
Tabela A.60– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 10, com uma concentração de 12,96 M e para uma temperatura de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	112
Tabela A.61 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	112
Tabela A.62 - condições usadas na experiência 11, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de $35^{\circ}\text{C}$ na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	113
Tabela A.63 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 11, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $402 \pm 6,2$ L/min.	114

Tabela A.64 – valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 11, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  L/min. 114

Tabela A.65 – dados experimentais do processo de regeneração da experiência 11, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  L/min. 115

Tabela A.66– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 11, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $400 \pm 7,4$  L/min. 115

Tabela A.67 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  L/min. 115

Tabela A.68 - condições usadas na experiência 12, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 40°C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  L/min. 116

Tabela A.69 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 12, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 40°C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  L/min. 117

Tabela A.70– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 12, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 40°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  L/min. 117

Tabela A.71– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 12, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 40°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  L/min. 118

Tabela A.72– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 12, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 40°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  L/min. 118

Tabela A.73 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  L/min. 118

Tabela A.74 - condições usadas na experiência 13, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30°C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  L/min. 119

Tabela A.75 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 13, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 6,2$  L/min. 119

Tabela A.76– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 13, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 6,2$  L/min. 120

Tabela A.77– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 13, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 30°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 6,2$  L/min. 120

Tabela A.78– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 13, com uma concentração de 15,35 M e para uma

temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 6,8 L/min.	120
Tabela A.79 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 6,2 L/min.	120
Tabela A.80 - condições usadas na experiência 14, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 6,2 L/min.	122
Tabela A.81 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 14, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 6,2 L/min..	122
Tabela A.82– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 14, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 6,2 L/min.	123
Tabela A.83– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 14, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 6,2 L/min.	123
Tabela A.84– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 14, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	123
Tabela A.85 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	123
Tabela A.86- condições usadas na experiência 15, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 8,69 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente em que se utilizou uma bomba de ar com um caudal de 358 ± 8,6 L/min.	125
Tabela A.87 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 15, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 8,69 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	125
Tabela A.88– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 15, com uma concentração de 8,69 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	126
Tabela A.89 – dados experimentais do processo de regeneração da experiência 15, com uma concentração de 8,69 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	126
Tabela A.90– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 15, com uma concentração de 8,69 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	126
Tabela A.91 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	127
Tabela A.92 - condições usadas na experiência 16, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	128
Tabela A.93 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 16, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35	

M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	128
Tabela A.94– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 16, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	129
Tabela A.95– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 16, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	129
Tabela A.96– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 16, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	129
Tabela A.97 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	130
Tabela A.98 - condições usadas na experiência 17, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35°C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	131
Tabela A.99 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 17, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	131
Tabela A.100– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 17, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	132
Tabela A.101– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 17, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	132
Tabela A.102– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 17, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	132
Tabela A.103 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	133
Tabela A.104 - condições usadas na experiência 18, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	134
Tabela A.105 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 18, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	134
Tabela A.106– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 18, com uma concentração de 14,26 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	135
Tabela A.107– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 18, com uma concentração de 14,26 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 8,6 L/min.	135



Tabela A.108– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 18, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 8,6 L/min.	135
Tabela A.109 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	136
Tabela A.110 - condições usadas na experiência 19, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,18 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	137
Tabela A.111 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 19, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,18 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min..	138
Tabela A.112– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 19, com uma concentração de 11,18 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	139
Tabela A.113– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 19, com uma concentração de 11,18 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 400 ± 7,4 L/min.	139
Tabela A.114– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 19, com uma concentração de 11,18 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	139
Tabela A.115 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 L/min.	140
Tabela A.116 - condições usadas na experiência 20, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	141
Tabela A.117 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 20, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	141
Tabela A.118– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 20, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	142
Tabela A.119– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 20, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	142
Tabela A.120– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 20, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	142
Tabela A.121 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	143
Tabela A.122 - condições usadas na experiência 21, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 17, 05 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 L/min.	144

Tabela A.123 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 21, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 17,05 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	144
Tabela A.124– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 21, com uma concentração de 17,05 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	145
Tabela A.125– dados experimentais do processo de regeneração da experiência 21, com uma concentração de 17,05 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	145
Tabela A.126– valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 21, com uma concentração de 17,05 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	145
Tabela A.127 – parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de $358 \pm 8,6$ L/min.	146
Tabela A.128 - condições usadas na experiência 22, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,04 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de $358 \pm 8,6$ L/min.	147
Tabela A.129 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 22, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,02 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de $358 \pm 8,6$ L/min.	148
Tabela A.130- valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 22, com uma concentração de 12,04 M e para uma temperatura de 35 °C em que se utilizou com um caudal de $358 \pm 8,6$ L/min.	148
Tabela A.131 - dados experimentais do processo de regeneração da experiência 22, com uma concentração de 12,04 M e para uma temperatura de 35 °C em que se utilizou com um caudal de $358 \pm 8,6$ L/min.	149
Tabela A.132 - valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 22, com uma concentração de 12,04 M e para uma temperatura de 35°C em que se utilizou com um caudal de $458 \pm 8,6$ L/min.	149
Tabela A.133 - parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio em que se utilizou com um caudal de $358 \pm 8,6$ L/min.	150
Tabela A.134 - condições usadas na experiência 23, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de $402 \pm 6,2$ L/min.	151
Tabela A.135 - resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 23, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de $402 \pm 6,2$ L/min.	152
Tabela A.136 - valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 23, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35 °C em que se utilizou com um caudal de $402 \pm 6,2$ L/min.	152
Tabela A.137 - dados experimentais do processo de regeneração da experiência 23, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35 °C em que se utilizou com um caudal de $402 \pm 6,2$ L/min.	153

Tabela A.138 - valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 23, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35°C em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  L/min. 153

Tabela A.139 - parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  L/min. 154



## SIMBOLOGIA

$V$  – Volume

$f_{\text{Diluição}}$  - fator de diluição

$\bar{V}$  – volume médio

$C_{\text{Cl}^-}$  – concentração de cloretos na amostra

$\dot{Q}$  – taxa de calor

$\dot{V}$  – caudal volumétrico

$\dot{m}$  – caudal mássico

$\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$  – calor latente de vaporização da água

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  – massa volúmica da água

$\lambda_{\text{LiCl}}$  - calor latente de vaporização do cloreto de lítio

$\rho_{\text{LiCl}}$  – massa volúmica do cloreto de lítio

$\pi$  – Pressão relativa

$\pi_{n=0..9}$  – Parâmetros para o calculo da pressão de vapor do cloreto de lítio

$P_{\text{LiCl}}(x_{\text{LiCl}}, T)$  - pressão de vapor do cloreto de lítio

$P_{\text{H}_2\text{O}}(T)$  - pressão de vapor da água

$A$  – constante para o calculo da pressão de vapor

$B$  - constante para o cálculo da pressão de vapor

$\theta$  - Temperatura reduzida (com a temperatura crítica da água, excepto quando definido de outra forma)

$x_{\text{LiCl}}$  – fração mássico do cloreto de lítio

$T_{c, \text{H}_2\text{O}}$  – temperatura crítica da água

$T$  – Temperatura

$\rho_{\text{LiCl}}(x_{\text{LiCl}}, T)$  – massa volúmica do cloreto de lítio

$\rho_i$  - Parâmetros para o cálculo da massa volúmica do cloreto de lítio

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}(T)$  - massa volúmica da água

$\Delta h_d$  – variação da entalpia de diluição

$\Delta h_{d,0}$  - variação da entalpia de diluição em relação a temperatura

$\varsigma$  – parâmetro da fração mássica do sal para o calculo da variação da entalpia da diluição

$t$  – tempo em horas

$T_a$  – temperatura ambiente

$T$  – temperatura

$e$ - espessura

$k$ - condutividade térmica

$h$  - coeficientes de transferência

$P_B$  – Potência da bomba

$R$  - Resistência a convecção

$N$  - número de tubos

$V_{\text{H}_2\text{O}, \text{evap}}^{\text{reg}}$  volume de agua evaporada no processo de regeneração

$\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}, \text{med}}^{\text{Evap}}$  caudal médio de de água evaporada

$V_{\text{H}_2\text{O}, \text{ac}}^{\text{Evap}}$  volume cumulativo de água evaporada

$\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}, \text{ins}}^{\text{Evap}}$  caudal instantâneo de de água evaporada

$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Prov}}$  volume de água na proveta

$V_{\text{LiCl}}^{\text{Prov}}$  volume de cloreto de lítio na proveta

$V_{\text{H}_2\text{O}, T}^{\text{Evap}}$  volume total de água evaporada



---

## **ABREVIATURAS**

Evap – evaporação

Reg- regeneração

COP – coeficiente de desempenho

CFC - clorofluorocarboneto

HCFC - hidrocloroflourocarboneto

HFC – hidrofluorocarboneto





## **1. Introdução**

Neste capítulo será apresentada uma introdução geral sobre a necessidade e as vantagens da implementação de um sistema de refrigeração com apoio térmico, assim como um resumo histórico sobre a evolução dos sistemas de refrigeração ao longo dos séculos até à atualidade.

Serão, ainda, descritos os sistemas de refrigeração, que sustentaram o desenvolvimento da unidade desenvolvida no âmbito do presente estudo, sendo apresentado um estudo do estado de arte dos sistemas de refrigeração com apoio térmico.



## 1.1. Enquadramento

A energia solar é considerada como um dos recursos energéticos mais promissores, e principal substituto das fontes energéticas tradicionais (Yu, et al., 2013). O seu uso ao longo dos anos tem sido aceite e incentivado, quer para aquecimento, quer para sistemas de refrigeração e ventilação em edifícios. Apesar da sua aceitação, o principal desafio continua a ser a instabilidade do recurso energético decorrente das alterações meteorológicas, havendo frequentemente um desfaseamento entre a disponibilidade e a procura desta fonte energética (Yu, et al., 2014).

Devido aos avanços tecnológicos, os preços dos equipamentos de climatização foram diminuindo ao longo dos anos e a maioria da população dos países desenvolvidos, passou a ter acesso a equipamentos de refrigeração, tais como bombas de calor e aparelhos de ar condicionados. Consequentemente, uma grande parcela da energia despendida ao nível doméstico é atualmente utilizada para aquecimento e refrigeração. Os benefícios económicos resultantes do elevado desempenho termodinâmico dos equipamentos, resultaram numa maior procura para proporcionar um maior conforto tanto ao nível industrial como doméstico.

Os ciclos de refrigeração tradicionais são acionados por eletricidade ou energias fósseis, aumentando em grande escala o consumo destes recursos, que em nada contribui para um crescimento sustentável. Outro grave problema associado a estes equipamentos é o uso dos fluidos refrigerantes que causam um grande impacto ambiental, nomeadamente os que contêm clorofluorocarbonetos (CFC), hidroclorofluorocarbonetos (HCFC) e hidrofluorocarbonetos (HFC), cuja utilização contribuiu em grande parte para a depleção da camada de ozono e o agravamento do efeito de estufa. (Demir, et al., 2008)

Efetivamente, face ao aumento da temperatura média global atmosférica e à agudização do problema da destruição da camada de ozono, foi necessário tomar medidas que atenuassem ou resolvessem estes problemas ambientais. Uma das primeiras medidas foi a implementação do Protocolo de Montreal de 1987 que regulamentava a produção dos produtos destruidores da camada de ozono, tendo como principal objetivo a extinção do uso de quinze tipos de CFC. Este protocolo entrou em vigor a 1 de Janeiro de 1989, tendo sido estipulada uma meta de dez anos para que os cento e cinquenta países aderentes eliminassem a produção destes produtos. A 11 de Dezembro de 1997 foi assinado o Protocolo de Quioto, que só entrou em vigor a 16 de Fevereiro de 2005, e que teve a adesão de cinquenta e cinco países, que assumiram o compromisso de reduzir em pelo menos 5,2 % as emissões dos gases com efeito de estufa, entre os quais estes compostos halogenados, em relação às emissões de 1990, no período de 2008 a 2012 (Demir, et al., 2008).

Mais recentemente o Parlamento Europeu implementou a 1 de Outubro de 2000 o regulamento Europeu 2037/2000 (entretanto alterado e revogado pelo Regulamento

CE 1005/2009 de 16 de setembro), que impôs que até 2015 todos os HCFC teriam de deixar de ser usados para a manutenção dos sistemas existentes (Fan, et al., 2007). Este regulamento define, ainda, o processo para controlo e eliminação de todas as substâncias que destroem a camada de ozono.

Em relação aos HFC, de acordo com o Regulamento UE nº 517/2014 de 16 de abril (europeia, P. e. (517/2014)), estas as emissões destes compostos têm de ser reduzidos em 72 a 73 % até 2030 e de 70 a 78 % até 2050 em comparação com as emissões de 1990.

A aplicação destes protocolos ao proibirem e limitarem o uso dos gases refrigerantes mais usados nas últimas décadas, serviu para impedir, ou pelo menos para conter, a continuação da destruição da camada de ozono. A indústria de refrigeração viu-se, assim, obrigada a contornar esta situação, desenvolvendo tecnologias mais sustentáveis e utilizando fluidos ambientalmente aceitáveis como é o caso do cloreto de lítio, brometo de lítio, entre outros, com o intuito de minimizar o impacto ambiental (Demir, et al., 2008; Rosato, et al., 2013; Rosato e Sibilio, 2013). Por exemplo, os equipamentos de refrigeração por absorção surgiram como uma alternativa aos sistemas de refrigeração convencional, utilizando fluidos refrigerantes que não afetam negativamente o ambiente, como soluções aquosas salinas, das quais se destacam os pares  $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ ,  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{S-H}_2\text{O}$  e  $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ .

Adicionalmente, estes sistemas de refrigeração podem contribuir para a redução do problema do aquecimento global, na medida em que utilizem energia solar, ou outra fonte energética renovável como fonte de calor. Estes sistemas surgiram como alternativa aos ciclos de compressão de vapor tradicionais (Rosato, et al., 2013), que utilizam energia elétrica para o seu funcionamento.

Os sistemas de refrigeração por absorção têm tido uma aplicabilidade mais direta do que o sistema de adsorção (Xu, et al., 2011), apesar de estes apresentarem mais vantagens, pois permitem operar numa gama de temperaturas mais elevada e são menos exigentes no que se refere aos problemas de corrosão e cristalização, (Rosato, et al., 2013), conforme irá ser analisado mais adiante.

O desenvolvimento de tecnologias de refrigeração ecológicas, como as tecnologias solares tornou-se um aspeto fulcral para a indústria de equipamentos de refrigeração, pois apresentam a vantagem de eliminar a maior parte dos efeitos nocivos dos equipamentos tradicionais. Coincidindo, na maioria das vezes, o período de procura com o de maior disponibilidade da energia solar, viu-se assim um grande potencial nesta fonte de energética (Fan, et al., 2007).

Os sistemas de refrigeração que operam a energia solar, como sistemas de adsorção/absorção não são ainda economicamente atrativos para as sociedades desenvolvidas (Li, et al., 2000), mas em zonas remotas em que não existe acesso fácil à energia elétrica esta é uma tecnologia com grande aplicabilidade (Li, et al.,

2000). Os sistemas de arrefecimento e aquecimento em tais áreas requerem sistemas alternativos e que incluem os sistemas acionados por painéis fotovoltaicos, sistemas de absorção, adsorção, dessecantes e sistemas de arrefecimento passivo (Enibe, 1997).

O maior problema dos sistemas de refrigeração que operam a energia solar é a grande dependência dos fatores climáticos, como a temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento, o seu efeito na temperatura da água de arrefecimento, etc (Li, et al., 2000).

Com o presente trabalho pretende-se desenvolver uma unidade de arrefecimento à escala laboratorial, recorrendo a uma solução de água / cloreto de lítio, em resposta a um desafio lançado pela empresa RR Energy Solutions.

A RR Energy Solutions é uma empresa criada em 2007, que tem como finalidade fornecer soluções técnicas na área das energias renováveis. Desde então, a empresa especializou-se na conceção, desenvolvimento e instalação de sistemas de energia renováveis. Entre os produtos oferecidos pela RR Energy Solutions encontram-se os sistemas solares para aquecimento de piscinas e de água quente sanitária e os sistemas fotovoltaicos para produção de energia. A empresa encontra-se atualmente interessada em estudar a viabilidade de desenvolvimento de um novo produto de refrigeração com apoio solar, o que motivou a realização do presente trabalho.

Os aparelhos de ar condicionado utilizam a energia elétrica na produção de frio. Como alternativa aos sistemas tradicionais pode-se recorrer a uma fonte de calor para manter um ciclo termodinâmico de refrigeração por absorção, por adsorção e por reação química. Estes sistemas apresentam, ainda, a vantagem de não usarem fluidos refrigerantes, tais como gases fluorados que contribuem para o efeito estufa ou substâncias depletoras da camada de ozono, mas sim uma solução líquida nos processos de absorção ou um material exsicante nos processos de adsorção.

Com particular interesse do ponto de vista ambiental encontram-se os sistemas de refrigeração passíveis de utilizar a energia solar como fonte de calor. Estes sistemas mostram-se adequados para climas quentes onde a atmosfera apresenta maior potencial de refrigeração. Particularmente relevante é a utilização destes sistemas em locais onde a exposição solar é elevada e, simultaneamente, a disponibilidade da rede de energia elétrica é deficiente, como acontece em Angola, país em que a empresa RR Energy Solutions se encontra a operar e onde pretende aplicar o eventual desenvolvimento de um sistema solar de refrigeração.

Neste contexto, pretende-se com este trabalho averiguar o estado da arte dos sistemas de refrigeração com apoio térmico por recurso à energia solar e desenvolver uma unidade de arrefecimento laboratorial, recorrendo a uma solução de água / cloreto de lítio. Depois de otimizadas as condições de funcionamento a eficiência energética da unidade desenvolvida será avaliada através da determinação de um

parâmetro característico na avaliação de desempenho de sistemas de refrigeração, o COP, coeficiente de desempenho.

## **1.2. Breve Descrição da Evolução Histórica dos Sistemas de Refrigeração**

Desde a pré-história que o homem tem a necessidade de melhorar o seu conforto térmico, usando processos para se aquecer ou refrescar, de forma a enfrentar as diferenças climáticas, e também de usar técnicas para promover a preservação dos alimentos. Ao desenvolver sistemas de refrigeração e ar condicionado, o homem contribui para um importante avanço da civilização (Santos, 2012).

As primeiras referências quanto à utilização de formas de refrigeração remontam ao Homem Cromagnon aproximadamente 100.000 anos atrás, com o uso de grutas e cavernas como frigoríficos naturais. Esta técnica continuou a ser utilizada no século XVII pela indústria da cerveja e voltou a ser recuperada atualmente na arquitetura moderna bioclimática, devido ao simples aproveitamento do efeito isolante do gradiente térmico de profundidade (Santos, 2012).

As primeiras provas documentais do efeito de refrigeração remontam à civilização egípcia de 2500 a. C., que devido à localização geográfica e ao clima, tinham que suportar temperaturas muito altas, incompatíveis com a existência de gelo natural. Com a necessidade de se refrescarem e preservarem os alimentos, os egípcios replicaram o efeito de refrigeração do próprio corpo humano, causado pela perspiração e transpiração. Para isso, utilizavam recipientes de barro semi-porosos que eram humedecidos de forma a promover a refrigeração do seu interior ao fornecer o calor latente de vaporização da água que se encontrava na superfície do vaso. Para intensificar este efeito, utilizavam mão-de-obra escrava para simular a função do vento, na sua ausência. Aplicaram também este método a grandes espaços, promovendo a evaporação da água de tanques, lagos ou telhados humedecidos, aplicando técnicas semelhantes. Para a produção de gelo tiraram partido do efeito radiativo noturno para a dissipação de energia térmica. Este método consistia no armazenamento, em noites com céu limpo de água em recipientes pouco profundos e bem isolados termicamente com palha e esterco, para promover a troca de calor por radiação com a estratosfera (com uma temperatura muito baixa), e assim ao amanhecer obtinham gelo. Este processo era muito comum na Índia e Egito. Em regiões onde esta técnica era desconhecida, o gelo era proveniente de regiões onde ele existia naturalmente ou era armazenado quando era produzido no Inverno. Por exemplo, Roma era abastecida de gelo proveniente do Alpes. Até ao século XIX o gelo era armazenado em palha, serradura e cortiça, em cavernas, grutas ou poços. Esta era a maneira mais comum na Europa e América de fornecer gelo aos mais abastados.

A refrigeração artificial só em 1748 pelas mãos do professor William Cullen é que começou a traçar os seus principais avanços. Cullen construiu o primeiro protótipo

laboratorial que produzia pequenas quantidades de gelo obtidas por vaporização forçada do éter a pressão reduzida, resultante de compressão mecânica.

Em 1777, Edward Neirne reproduziu a experiência de Cullen, mas ao invés de utilizar éter, substituiu-o por ácido sulfúrico e introduziu uma bomba de vácuo para vaporizar a água. O vapor de água era absorvido pelo ácido sulfúrico, tornando-se o processo mais rápido. Apesar desta enorme avanço no processo de refrigeração, não houve uma aplicação comercial “dada a natureza demasiado instável do ácido sulfúrico”. Em 1810 John Leslie, voltou a retomar os estudos de Cullen e Nairne, ao construir um protótipo de um equipamento de refrigeração intermitente.

Em 1823 Ferdinand Carré construiu e patenteou a primeira máquina de refrigeração por absorção, que foi muito usada para a fabricação de gelo pelos sulistas na Guerra Civil Americana. Foi produzida em grande escala em França, Inglaterra e Alemanha. Este equipamento trabalhava com  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ , tendo como fundamentos as investigações do irmão mais novo de Carré, que utilizou ácido sulfúrico e permitia trabalhar com líquidos e sólidos em sistemas de absorção e adsorção, assim como Nairne tinha feito anos antes. Os irmãos Carré foram grandes impulsionadores do sistema de refrigeração, tendo Ferdinand registado mais de cinquenta patentes relacionadas com máquinas de refrigeração, catorze das quais sobre o sistema  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ . Em 1824, Faraday desenvolveu uma máquina de refrigeração intermitente que trabalhava com amónia e cloreto de prata.

Em 1806, Frederic Tudor, conhecido como o Rei do Gelo, promoveu intensamente a distribuição comercial de gelo. O seu negócio consistia no corte de gelo do Rio Hudson e de Lagoas em Massachusetts, em Nova Inglaterra, que era posteriormente exportado para várias zonas do planeta, com preços mais baixos do que o gelo que provinha da Índia, produzido por arrefecimento radiativo.

No século XIX existiram muitos avanços no que diz respeito a liquefação de gases e a sistemas de refrigeração, principalmente na primeira metade do século.

A primeira máquina de refrigeração por compressão foi patenteada em 1834 por Jacob Perkins, sendo fundamentada pela investigação de Olivier Evans que, por sua vez, adaptou a sua investigação aos conhecimentos de Nairne e Cullen. Todas estas investigações tiveram como base principal o conceito de frigorífico introduzido por Thomas Moore, que consistia numa caixa metálica hermética que utilizava como isolante madeira com peles de coelho (Althouse, et al., 2000).

O século XIX registou um grande avanço tecnológico na área, ao serem patenteadas inúmeras máquinas de refrigeração, como por exemplo, a máquina de expansão de Gorrei, a máquina de absorção de Ferdinand Carré, entre outras, sendo muitos destes equipamento ainda produzidos atualmente.

Augustin Mouchot, em 1861, patenteou a primeira máquina a vapor com apoio solar, apresentando-a em França quinze anos mais tarde.

As máquinas de refrigeração por absorção tiveram o seu pico de popularidade no fim do século XIX e início do século XX, pois tornaram-se muito mais vantajosas, quando comparadas com máquinas de compressão a vapor. Este facto deve-se a que as máquinas de refrigeração por compressão a vapor utilizavam uma fonte térmica para produzirem trabalho mecânico, enquanto as máquinas de absorção trabalhavam com menores necessidades térmicas, podendo utilizar calor residual (vapor e gases de combustão).

Com o aparecimento, em 1880 dos motores elétricos nos sistemas de compressão mecânico a vapor começou a verificar-se o desinteresse pelos sistemas de refrigeração por absorção, pois acoplando-se os motores elétricos aos sistemas de compressão mecânica a vapor, estes alcançavam maiores rendimentos que os sistemas de refrigeração por absorção.

Em 1913, Edmund Alternkirch minimizou as irreversibilidades verificadas nas máquinas de absorção, e propôs um conjunto de melhorias às máquinas existentes.

Em 1922 dois estudantes do Royal Institute of Stockholm, Carl Munters e Baltazar von Platen, desenvolveram uma das mais importantes evoluções na tecnologia de absorção, ao suprimirem a bomba de circulação e substituindo-a pelo princípio percolador. Este novo ciclo é mais simples e trabalha a uma pressão única onde é usado um gás inerte, como por exemplo o hidrogénio, que era introduzido no ambiente de baixa pressão de modo a que toda a unidade operasse à mesma pressão. Com o decorrer dos anos esta tecnologia também sofreu várias modificações, ao substituir-se o hidrogénio por hélio e depois por amoníaco. Esta tecnologia não era novidade, mas até então não tinha sido realizada com sucesso, em 1899 o investigador Geppert foi o primeiro a propô-la, mas sem sucesso pois utilizava o ar como gás condensável, e tendo o ar um peso molecular superior ao da amónia este impedia-o de circular naturalmente. Em 1926 Einstein e Szilárd realizaram o mesmo sistema, mas com metano e água, tendo como gás inerte o amoníaco.

Nos anos 30 a empresa Electrolux iniciou a comercialização dos aparelhos de refrigeração de Platen-Munters, que muito facilmente foi adotado pela refrigeração doméstica por serem máquinas silenciosas e fiáveis, principalmente onde a energia elétrica era inacessível. Nos anos 20 / 30 houve uma grande produção de máquinas de refrigeração intermitente, como por exemplo a Ice-ball, a Superflex e a Trukold.

Na década de 40 foi produzido por Servel uma máquina de refrigeração que utilizava  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$  como par refrigerante, mas foi Willis Carrier o primeiro a comercializar um refrigerador de absorção, que utilizava este par como par de trabalho, que apenas se popularizou na década seguinte, e que constitui atualmente uma das misturas mais usadas em máquinas de absorção aplicadas ao condicionamento de ar. Nestas



últimas décadas houve uma grande evolução nos sistemas de absorção a pressão total única, com a aplicação de conceitos termodinâmicos de misturas binárias e do estudo da segunda lei da termodinâmica, foi possível fazer uma análise cuidada dos processos envolvidos percebendo-se a possibilidade da lei das pressões parciais (lei de Dalton) da amónia e do hidrogénio no sistemas de absorção a pressão total única que apresentavam menores perdas energéticas.

Nos anos 50 apareceu o primeiro protótipo de uma máquina de absorção que funcionava a energia solar, surgindo assim o primeiro sistema de absorção de vapor de amoníaco com funcionamento intermitente para camiões frigoríficos.

Em 1965, Woolrich apresentou um estudo pioneiro onde descrevia o sistema de refrigeração por absorção, publicando tabelas completas com propriedades termodinâmicas sobre o vapor de amónia em solução com água (Althouse, et al., 2000).

Com a crise do petróleo na década de 70, o interesse por esta tecnologia voltou a aumentar, principalmente porque utilizava o calor rejeitado noutros processos, como por exemplo a combustão em cogeração, mas também porque utilizava a energia solar (Althouse, et al., 2000).

Em 2000 foi patenteada uma unidade de refrigeração por absorção que armazena simultaneamente o frio e o calor, pela empresa Sueca Climatewell, cujo processo será descrito mais adiante. (Olsson, 2007).

Com a problemática ambiental a ter cada vez mais peso, havendo uma maior consciencialização ecológica e um maior aproveitamento dos recursos naturais esta tecnologia tem ganho uma maior importância no mercado, pois utiliza soluções que não contribuem para o dois dos principais problemas ambientais da atualidade o aquecimento global e a depleção da camada de ozono.

### **1.3. Sistemas de refrigeração**

Sabe-se que a transferência de calor ocorre de um meio ou região que se encontra a uma temperatura mais elevada para um outro meio ou região a uma temperatura mais baixa. O processo contrário não ocorre naturalmente, pelo que é necessário um equipamento que promova essa troca de calor, como um refrigerador, uma unidade de ar condicionado ou uma bomba de calor (Carvalho, 2007).

Nos ciclos de refrigeração podem-se utilizar dois tipos de energia: mecânica ou térmica. Quando no ciclo está envolvida uma forma de energia mecânica este é designado por ciclo de compressão de vapor, e no caso da energia usada ser térmica está-se perante um ciclo térmico, um sistema de absorção, adsorção ou dessecante (Santos, 2012).

Estes equipamentos, de acordo com a temperatura de operação, podem ser classificados em:

- Ar condicionado (8 -30 °C), usados na climatização de espaços;
- Refrigeradores (0 -8 °C), utilizados no armazenamento de alimentos, vacinas, etc.
- Congeladores ( < 0,1 °C), usados para produção de gelo ou congelação (Fan, et al., 2007).

Estes equipamentos contariam a ordem natural da transferência de calor, na medida em que têm a capacidade de retirar calor do meio com temperatura mais baixa e direcioná-lo para um meio com uma temperatura mais elevada.

A principal diferença entre um refrigerador e uma bomba de calor, é que o primeiro mantém o espaço a refrigerar a uma temperatura baixa, removendo calor, enquanto que o segundo mantém o espaço aquecido a uma temperatura alta, absorvendo calor de uma fonte de baixa temperatura (Cengel, et al., 2006). Já um equipamento de ar condicionado tem a capacidade de controlar a temperatura e a humidade, promovendo conforto térmico, e, por isso, é muito utilizado em espaços com uma densa ocupação humana (Fan, et al., 2007).

Todos estes sistemas de refrigeração por compressão de vapor trabalham em ciclo, ou seja, o estado inicial do fluido (refrigerante) envolvido no processo e o seu estado final, após circular no sistema, são coincidentes, no que diz respeito às suas propriedades físicas. (Carvalho, 2007).

### 1.3.1. Sistema de refrigeração por compressão de vapor

Nos sistemas de refrigeração por compressão de vapor um fluido (o fluido refrigerante) sofre uma expansão acompanhada de mudança de fase (passagem do estado líquido para o estado de vapor) com a consequente remoção de calor. O refrigerante (líquido) a uma pressão elevada deixa o condensador, e ao passar pela válvula de expansão a sua pressão é reduzida isentalpicamente. A mistura de líquido e vapor saturado, que se encontra a uma pressão baixa, vaporiza ao passar através do evaporador, removendo calor do meio a arrefecer, passando para o estado de vapor saturado a baixa pressão. Posteriormente, é comprimido no compressor e condensa libertando o calor latente e fechando o ciclo.

A Figura 1.3.1 representa o esquema básico de uma unidade de compressão de vapor.

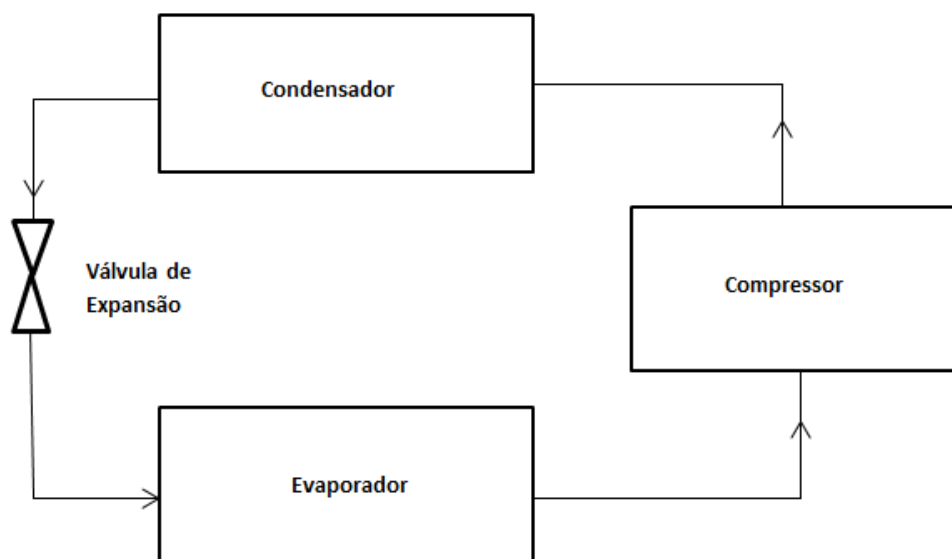


Figura 1.3.1 – Representação esquemática do sistema de refrigeração ideal por compressão mecânica (adaptado de (Cengel, et al., 2001).

O ciclo de refrigeração ideal descrito anteriormente pode ser representado num diagrama pressão-entalpia ( $P$  versus  $h$ ), conhecido por diagrama de Mollier, o que facilita a sua compreensão em termos de análise termodinâmica. O processo de compressão de vapor apresenta quatro etapas para concluir um ciclo, esquematizadas na Figura 1.3.2. A etapa A - B é caracterizado pela compressão do fluido refrigerante que ocorre no compressor; a etapa B - C traduz a condensação com rejeição de calor para o meio ambiente, a etapa C - D representa a expansão isentálpica que tem lugar na válvula de expansão; e a etapa D - A traduz a evaporação do refrigerante com remoção de calor do meio a ser refrigerado.

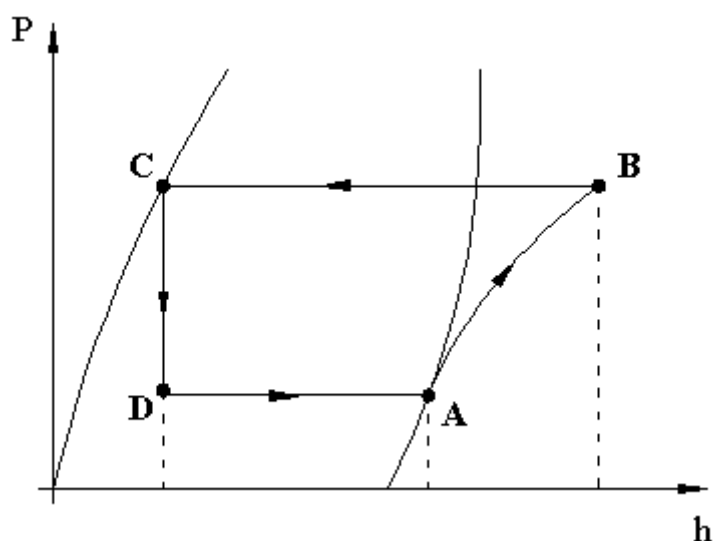


Figura 1.3.2 – Diagrama pressão (P) vs entalpia (h) do sistema de refrigeração ideal por compressão a vapor (Flores, et al., 2014).

A diferença fundamental entre o sistema de refrigeração por compressão a vapor e os sistemas de absorção e adsorção é a forma de promover a compressão do fluido refrigerante. Nos sistemas de compressão a vapor o fluido é comprimido por um sistema mecânico (Carvalho, 2010), um compressor, e nos sistemas de refrigeração por absorção / adsorção o compressor é substituído por um gerador e condensador. As grandes vantagens do sistema de compressão a vapor são que a potência necessária para a compressão do fluido de compressão a vapor são que a potência necessária para a compressão do fluido é menor (Rosiek e Batlles, 2009), relativamente aos sistemas de refrigeração por absorção e adsorção.

### 1.3.2. Sistema de refrigeração por adsorção

O processo de adsorção consiste na transferência de um fluido, líquido ou gasoso, para uma substância no estado sólido, onde fica retido. O processo de adsorção é exotérmico (liberta calor), o calor libertado depende das forças electrostáticas envolvidas, do calor latente e da energia de ligação.

Os adsorventes caracterizam-se pela sua área específica e polaridade. Os que apresentam uma grande superfície específica são os preferidos por apresentarem uma grande capacidade de adsorção. A grande área específica interna do adsorvente resulta do número elevado de poros cuja configuração caracterizam o adsorvente quanto à acessibilidade das moléculas para a adsorção (Sumathy, et al., 2003).

O calor libertado durante o fenómeno de adsorção é 30 - 100 % superior ao verificado durante a condensação, sendo, por isso, o processo de adsorção em termos de libertação de calor mais vantajoso do que o processo de condensação da fase gasosa do refrigerante (Sumathy, et al., 2003).

O ciclo de refrigeração por adsorção que se conhece há mais tempo é o ciclo intermitente com um único leito fixo, também conhecido por ciclo de adsorção básico. Este ciclo é bastante fiável e simples, mas possui uma baixa eficiência e trabalha em descontínuo, pelo que a produção de frio não é constante. Os ciclos de adsorção mais comuns são: o ciclo de recuperação de calor, o ciclo de recuperação de calor e massa, o ciclo de onda térmica, o ciclo com múltiplos leitos fixos, etc (Wang, et al., 2010). O processo de adsorção é idêntico ao de absorção, mas ao invés de utilizar o adsorvente em estado líquido, este encontra-se no estado sólido.

O sistema de refrigeração por adsorção é constituído por um adsorvedor, um condensador, uma válvula de redução e um evaporador, através dos quais o adsorbato (o refrigerante) circula em ciclo. O processo cíclico opera entre níveis diferentes de temperatura e pode ser visto como dois ciclos de trabalho separados (Demir, et al., 2008).

No primeiro ciclo do processo de refrigeração por adsorção o refrigerante líquido é vaporizado removendo calor do espaço a ser refrigerado (que se encontra a um nível de temperatura baixo), e é encaminhado para o adsorvedor, onde é adsorvido por um sólido muito poroso, libertando calor para uma fonte de calor a uma temperatura intermédia. Este ciclo representa a etapa de adsorção do ciclo de refrigeração. O processo cessa quando o sólido perde a capacidade de adsorver o refrigerante. Ao terminar o processo de adsorção tem de se proceder à regeneração do adsorvente. O segundo ciclo do processo, relativo ao processo de regeneração do adsorvente (ou desorção) pressupõe o fornecimento de calor a partir de uma fonte quente (nível de temperatura elevado) à solução proveniente do processo de adsorção, que é constituída pelo refrigerante mais o adsorvente, para evaporar o refrigerante (com menor ponto de ebulição) que volta ao reservatório do refrigerante onde é condensado (Xu, et al., 2011).

O par de trabalho que tem merecido mais atenção ao longo dos anos é o par sílica gel-zeólitos que utiliza a água como fluido de trabalho. Recentemente surgiram novas classes de materiais, como os alumino- fosfatos, silicioaluminofosfatos e estruturas compostas metal-substância orgânica, e também materiais porosos com grande capacidade de armazenamento de calor (Yu, et al., 2013).

### **1.3.3. Sistema de refrigeração por absorção**

Durante o processo de absorção ocorre a transferência de um fluido refrigerante, no estado gasoso, para um fluido absorvente líquido. Estes dois fluidos (refrigerante e absorvente) têm de ter grande afinidade entre si. O fluido refrigerante ao ser absorvido é responsável por uma variação na composição da solução absorvente. Este processo é exotérmico (liberta o calor de mistura), reversível e é equivalente à condensação, pois verifica-se uma mudança de fase (gasosa para líquido) no fluido refrigerante (Kim, et al., 2008).

Os processos de absorção foram os mais adaptados para sistemas de refrigeração solar, pois operam com pouca ou nenhuma energia elétrica, e para uma mesma capacidade, as dimensões de uma unidade de absorção são menores do que as unidades de adsorção. O absorvente apresenta também uma maior flexibilidade na fluidez, contribuindo para a realização de um equipamento mais compacto e/ou eficiente.

Os pares de trabalho utilizados nos sistemas de refrigeração por absorção são soluções binárias compostas por um absorvente e por um refrigerante, sendo os mais utilizados os pares  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ,  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  e  $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ . O primeiro par referenciado utiliza a água como absorvente e a amónia como refrigerante e é mais utilizado em unidades industriais, ao contrário dos restantes que utilizam a água como refrigerante e a solução salina como absorvente e são mais usados em equipamentos de refrigeração domésticos (Chan, et al., 2013).

O ciclo de refrigeração por absorção é muito parecido com o sistema de compressão de vapor, são ambos constituídos por uma válvula de expansão, um condensador e um evaporador. A diferença fundamental entre estes dois ciclos está no princípio de funcionamento, o ciclo de absorção ao invés de utilizar um compressor utiliza um sistema composto por um absorvedor, um gerador e uma bomba circuladora para compressão no estado líquido e um dispositivo de expansão.

O princípio básico de uma máquina de refrigeração por absorção consiste em ligar dois recipientes sob vácuo, em que um deles contém o refrigerante e o outro a solução binária com o absorvente, como é apresentado na Figura 1.3.3. O refrigerante que provem do evaporador no estado de vapor saturado, entra no absorvedor e é absorvido pela solução binária, provocando uma queda de pressão no evaporador à medida que o refrigerante está a ser absorvido com a consequente diminuição da temperatura de saturação do refrigerante. Por sua vez, no absorvedor a temperatura aumenta devido ao calor produzido pelo processo de absorção do refrigerante que não é mais do que a soma do calor latente, que resulta da condensação do refrigerante, e do calor de diluição da mistura binária que ocorre no absorvedor. No decorrer do processo de absorção a solução binária vai ficando cada vez mais diluída até deixar de ter capacidade de absorver o refrigerante, terminando, assim, o

processo de absorção. Quando a solução está de tal modo diluída que não tem capacidade de refrigerar tem de ser regenerada de modo a que volte a apresentar as condições iniciais. Para isso, procede-se à evaporação do refrigerante e posterior, separação do absorvente, que não é mais do que um processo de desidratação da solução, ou seja, de remoção do refrigerante em excesso. No processo de regeneração do absorvente com a remoção do refrigerante em excesso, o calor é o principal interveniente e deve ser, aplicado ao recipiente com a solução binária diluída. Esta necessidade de regeneração do absorvente é responsável por uma descontinuidade no processo de refrigeração por absorção, quando a solução deixa de ter capacidade de absorver. Pode-se, assim, afirmar que o ciclo de refrigeração por absorção é composto por dois processos, um de absorção / evaporação e outro de desabsorção do refrigerante pela solução binária. Todo o processo de regeneração da solução ocorre a uma pressão mais elevada do que o processo de absorção.

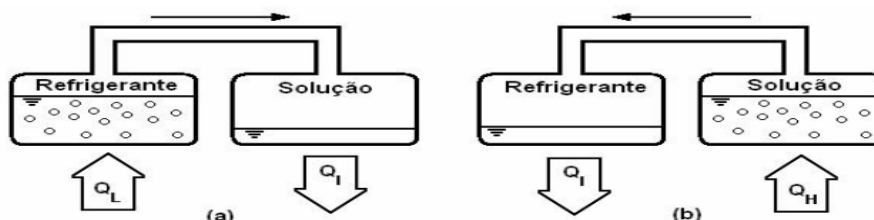


Figura 1.3.3 - Processo referente ao efeito de refrigeração; b) Processo referente ao efeito de regeneração do absorvente (fornecimento de calor,  $Q_H$ , ao gerador que contém a solução absorvente) (Adaptado de Srihirin, et al., 2001).

Estes sistemas de efeito simples e intermitentes evoluíram posteriormente para processos contínuos. Assim ao evaporador e absorvedor, foi acoplado um gerador, um condensador e uma bomba de recirculação permitindo que o processo passe a ser realizado em contínuo, ou seja, deixando de existir a necessidade de interrupção para regenerar o absorvente, pois este vai ocorrendo à medida que a solução vai sendo diluída.

O ciclo de absorção divide-se, então, em quatro etapas principais, em que duas se caracterizam por trocas de calor e as outras duas englobam trocas de calor e de massa. As quatro etapas principais são: a vaporização do fluido refrigerante no evaporador, a absorção do fluido refrigerante pela solução no absorvedor, a separação dos componentes da mistura binária no gerador através da adição de calor até ocorrer a vaporização do fluido refrigerante e a condensação do refrigerante no condensador.

O funcionamento do absorvedor e do evaporador é igual ao já descrito anteriormente para o processo intermitente. A solução binária diluída é continuamente bombeada do absorvedor para o gerador, onde é aquecida a uma temperatura superior à temperatura de ebulição do refrigerante, separando-se o refrigerante do absorvente. O refrigerante, agora no estado de vapor é encaminhado para o condensador, onde é condensado a uma temperatura e pressão elevadas. Passa depois para o

evaporador, onde é novamente evaporado a uma pressão baixa, proporcionando novamente o arrefecimento do espaço a refrigerar. Entretanto, a solução concentrada retorna ao absorvedor, para voltar a absorver o refrigerante que é vaporizado no decorrer do processo de arrefecimento do espaço. A solução concentrada ao voltar para o absorvedor passa por uma válvula redutora de pressão. Na Figura 1.3.4 encontra-se a representação esquemática da unidade de absorção.

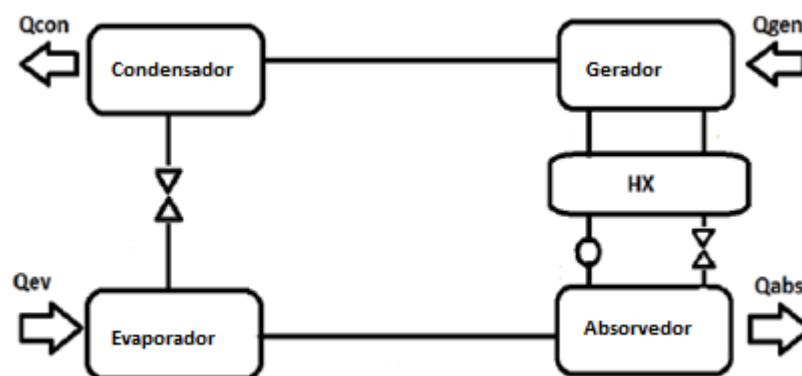


Figura 1.3.4 - Esquema de uma unidade de absorção básica (adaptado de (Flores, et al., 2014)).

Este foi o mecanismo usado durante muitos anos. Atualmente utiliza-se um mecanismo similar, mas ao invés de se usar um gerador para evaporar o refrigerante e um condensador para condensá-lo, existe apenas o absorvedor e evaporador, que possuem também essas funções (Carvalho, 2010).

Assim, quando se pretende regenerar a solução diluída do sal fornece-se calor a uma temperatura elevada ao absorvedor, provocando a evaporação do refrigerante que se transfere para o absorvedor onde condensa, ou seja, nesta fase o absorvedor realiza a função do gerador e o evaporador de condensador, havendo só a necessidade de controlar adequadamente a pressão de forma a reverter o processo.

O sistema de refrigeração por absorção pode ainda ser classificado quanto ao número de vezes que aproveita a energia térmica, podendo ser denominado de sistema simples, duplo ou triplo.

O sistema de refrigeração por absorção simples aproveita a energia térmica uma única vez e tem apenas um gerador, que, como já foi referido anteriormente, é utilizado para evaporar o refrigerante da solução binária. Este sistema é economicamente o mais rentável uma vez que em resultado da baixa eficiência do equipamento, pode operar recorrendo a uma fonte de calor residual a uma temperatura mais baixa, o que minimiza o seu custo (Jaruwongwittaya, et al., 2010).

O sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito contém dois geradores, em que o primeiro opera a alta pressão, produzindo refrigerante gasoso que ao condensar liberta calor, que é utilizado para evaporar o refrigerante no segundo gerador que trabalha a baixa pressão. Entre o primeiro e o segundo gerador existe um permutador de calor que permite a recuperação de calor, que é aproximadamente o



dobro da verificada no sistema simples e, consequentemente, estes sistemas apresentam um coeficiente de desempenho (COP) aproximadamente duas vezes maiores. A maior desvantagem na utilização destes sistemas é que, no caso de se pretender operar com apoio solar, necessita de fontes de calor dificilmente atingíveis com painéis solares convencionais (Yin, et al., 2012). Para além do sistema simples e duplo, também existem sistemas triplos, onde são utilizados três geradores e condensadores, que apresentam uma capacidade de refrigeração superior a 100 kW. A temperatura de regeneração destes sistemas diminui à medida que se vai aumentando o número de geradores e condensadores, pelo que a eficiência do equipamento também aumenta pois as necessidades energéticas para evaporar o refrigerante são cada vez mais baixas (Ullah, et al., 2013)

O ciclo de duplo efeito pode ter dois tipos de configuração, em paralelo ou em série, dependendo do modo como a solução sai do absorvedor. Na configuração em série a solução diluída sai do absorvedor e é bombeada para o gerador de alta temperatura e em seguida passa para o gerador de baixa temperatura. Na configuração em paralelo a solução diluída é dividida no permutador de calor intermédio e reencaminhada para os dois geradores. As correntes de solução concentrada são misturadas antes de serem encaminhadas de novo para o absorvedor.

A configuração em paralelo apresenta valores de eficiência do equipamento maiores do que a configuração em série, pois opera com valores de pressão de vapor mais baixas, o que reduz a energia térmica necessário no gerador, mas em contrapartida o risco de cristalização do absorvente da solução é maior.

O sistema de refrigeração por absorção apresenta inúmeras vantagens, como por exemplo, a possibilidade de usar como fonte energética coletores solares disponíveis no mercado, o facto de não utilizar CFC ou HCFC e, ainda, o facto de poder utilizar calor residual, isto é a energia perdida por outros processos, como por exemplo a resultante do funcionamento de uma caldeira. É uma aplicação com potencial para o uso da energia solar, em especial, devido à coincidência entre as maiores necessidades de carga de refrigeração e a abundância de energia solar disponível (Yin, et al., 2012; Jaruwongwittaya, et al., 2010).

Na Tabela 1.3.1 encontram-se descritas as principais vantagens e desvantagens do sistema de refrigeração por absorção

Tabela 1.3.1 – Vantagens e desvantagens do sistema de refrigeração por absorção (Carvalho, 2010; Kim, et al., 2008; Rosato, et al., 2013).

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Consome 5 a 10% da energia elétrica que é consumida por um sistema de compressão a vapor de igual capacidade frigorífica	A impopularidade do sistema
Baixo nível de ruído.	Grandes dimensões (peso, volume por unidade de capacidade frigorífica)
Não necessita de energia elétrica para trabalhar	Necessidade de duas a três vezes mais água ou ar para o arrefecimento.
Capacidade de se poder variar a fonte térmica externa	Custo inicial mais elevado.
Tem poucas ou nenhuma partes móveis	
Potencial poluente baixo	

#### 1.3.4. Sistemas de refrigeração com apoio solar

Os sistemas de refrigeração por absorção e, por adsorção são frequentemente implementados para operarem com apoio solar.

Os sistemas de refrigeração solar utilizam a energia solar como forma de ativar o seu ciclo, mas também poderá ser utilizada energia elétrica para o acionamento de equipamentos secundários, como por exemplo, de bombas para o deslocamento do fluido refrigerante (Ferrari, 2005). A principal vantagem das instalações de refrigeração movidas a energia solar é que a necessidade de refrigeração é maior quando a radiação solar é mais intensa (no verão). Os principais problemas encontrados na utilização destas unidades incluem a sua dependência de variáveis ambientais, como temperatura externa, radiação solar e velocidade do vento, juntamente com seu elevado custo inicial. A refrigeração solar ainda não é capaz de competir economicamente com os sistemas de ar condicionado convencionais, porque em termos de execução os sistemas solares são mais caros do que as unidades de compressão mecânica convencionais (Lizarte, et al., 2012)

Na Tabela 6.1 encontra-se o resumo das características dos sistemas de refrigeração solar por absorção e, por adsorção (Lizarte, et al., 2012).

Tabela 1.3.2 – Principais características dos sistemas de refrigeração solares térmicos adaptado de (Ferrari, 2005).

Sistema	Temperatura de regeneração (°C)	COP	Fluido de trabalho	Refrigeração	Ar condicionado
<b>Absorção</b>	80 - 190	0,6 - 0,8 (simples) ≤ 1,3 (duplo)	NH <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O H <sub>2</sub> O / LiCl H <sub>2</sub> O / LiBr	x	x
<b>Adsorção</b>	80 - 300	0,3 - 0,8	H <sub>2</sub> O/ zeolite, metanol/ carvão ativado	x	

Os sistemas de arrefecimento que utilizam energia solar podem ser classificados, em sistemas: fechados e sistemas abertos.

Nos sistemas fechados o refrigerante é reutilizado fazendo parte de um processo cíclico de absorção ou de adsorção. São bons exemplos de tais sistemas os refrigeradores térmicos que produzem água refrigerada para alimentação de unidades de tratamento de ar (arrefecimento e desumidificação) (Mateus, 2007).

Nos sistemas abertos o refrigerante é removido do sistema depois de promover o efeito de arrefecimento pretendido, sendo fornecido novo refrigerante ao sistema. Os sistemas mais frequentes usam uma substância dessecante num processo cíclico que combina a desumidificação do ar com o arrefecimento evaporativo e, por isso, são usados para o tratamento de ar (arrefecimento e desumidificação) (Mateus, 2007).

Para se poder avaliar o desempenho de um ciclo de refrigeração é usualmente utilizado um parâmetro designado por coeficiente de desempenho (COP).

O coeficiente de desempenho é definido como a razão entre a quantidade de calor que se pretende retirar e a quantidade de calor/energia necessário fornecer para realizar essa tarefa. Frequentemente, o coeficiente de desempenho é apresentado para sistemas de compressão, mas como estes utilizam um compressor mecânico para retirar o calor e os sistemas de absorção utilizam um gerador para o mesmo efeito, a definição deste parâmetro terá de ser adaptada. A definição de coeficiente de desempenho para uma unidade de absorção comum é definido segundo a Equação (1), não sendo utilizada neste estudo uma vez que não se utilizou um gerador.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\text{evaporação}}}{\dot{Q}_{\text{Geração}}} \quad (1)$$

Sendo assim, na Equação ( 2) encontra-se a definição do COP utilizado neste estudo, que ao invés de utilizar o calor de geração, utiliza o calor de regeneração da solução diluída de cloreto de lítio, ao qual se soma a potência consumida da bomba de circulação de ar, da unidade. A utilização da bomba circuladora de ar será apresentada no Capítulo 0.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\text{evaporação}}}{\dot{Q}_{\text{Regeneração}} + P_B} \quad (2)$$

Os equipamentos de refrigeração por absorção que atualmente se encontram disponíveis apresentam COP que variam entre os 0,3 e 1,2 e a escolha do tipo de equipamento depende do desempenho do coletor solar que é usado. Uma máquina de refrigeração que opere com o par de trabalho LiBr-H<sub>2</sub>O apresenta um COP típico de 0,7, operando em efeito simples, e um COP de 1,2 se operar em efeito duplo (Chan, et al., 2013; Kim, et al., 2008).

## 1.4. Estado de arte dos Sistemas de Refrigeração por Absorção

No que se refere ao estudo do estado da arte dos sistemas de refrigeração por absorção, com incidência nos que apresentam apoio solar é de destacar um conjunto de artigos de revisão publicados, que efetuam a listagem dos principais desenvolvimentos observados neste tipo de equipamento, dos quais se destacam:

Li e Sumathy em 2000 apresentaram um artigo de revisão sobre sistemas de refrigeração de absorção com apoio solar, que tinham como par de trabalho o LiBr-H<sub>2</sub>O. Neste estudo os autores constataram que a temperatura de entrada no gerador é o parâmetro mais importante na concepção e fabrico do sistema em análise. Constataram, ainda, que os sistemas de efeito simples com armazenamento de energia apresentam vantagens no período de maior insolação, enquanto os sistemas de duplo efeito tem um COP maior em termos gerais. O sistema de duplo efeito tem a vantagem de não requerer temperaturas elevadas no gerador, o que possibilita a utilização de coletores solares planos. No ano seguinte (Li, et al., 2001) apresentaram os resultados de um sistema de refrigeração de energia solar que operava com LiBr-H<sub>2</sub>O, com uma capacidade de refrigeração de 4,7 kW.

Fan e coautores (2007) apresentaram o estado de arte de sistema de refrigeração de absorção e adsorção, num artigo onde fazem uma introdução teórica sobre os conceitos básicos e um resumo histórico do desenvolvimento dos sistemas e do progresso desta tecnologia de refrigeração com recurso a energia solar. Este tipo de tecnologia é caracterizado, principalmente, pela sua capacidade de atingir temperatura de arrefecimento reduzidas, tornando-se muito atraente, nomeadamente em processos de refrigeração e de produção de gelo (Fan, et al., 2007).

Em 2008, os investigadores Kim e Ferreira realizaram uma listagem detalhada das principais opções de refrigeração: absorção, adsorção, termo-mecânica, classificando-as de acordo com o desempenho relatado por investigadores de estudos anteriores. Sobre aplicações solares térmicas de refrigeração por absorção, estes autores compararam as diferentes soluções tanto do ponto de vista energético, como da viabilidade económica, tendo concluído que se trata de uma tecnologia muito estudada. Os pares de trabalho mais usados nesta tecnologia são o H<sub>2</sub>O-LiBr e NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O, mas, genericamente, o segundo par é mais utilizado para o processo de refrigeração, enquanto o primeiro é mais utilizado em sistemas de ar condicionado (Kim e Ferreira, 2008).

Ullah e coautores (2013) apresentaram um estudo detalhado sobre os diferentes sistemas de refrigeração, focando-se principalmente nos sistemas de absorção e adsorção com diferentes fluidos e adsorventes de trabalho, sendo os principais pares o LiBr-H<sub>2</sub>O e o LiCl-H<sub>2</sub>O. Concluíram que os sistemas de refrigeração analisados têm mais vantagens ao serem aplicados em áreas remotas ou ilhas onde os sistemas de refrigeração convencionais, por deficiente acesso à rede de energia elétrica, não são viáveis. Este estudo resume, também, os vários pares de trabalho utilizados em

sistemas de absorção solar, as suas vantagens e desvantagens, assim como os resultados obtidos. Estes autores concluíram que o COP do sistema de refrigeração por absorção é melhor que o determinado em sistema de adsorção, não se verificando os problemas mais comuns nos sistemas de refrigeração solar, tais como problemas de cristalização e corrosão (Ullah, et al., 2013).

Chan e coautores (2013) apresentaram um estudo do estado da arte das tecnologias de armazenamento térmico de absorção / adsorção. Neste trabalho os autores classificam detalhadamente os processos de absorção / adsorção, indicando os pares de trabalhos indicados para o armazenamento térmico. Concluíram que quer o processo de absorção, quer o de adsorção são uma boa solução para o armazenamento de calor a longo prazo, mas referem a necessidade de serem feitos estudos adicionais em termos de avaliação dos pares de trabalho e de desenvolvimentos de protótipos mais eficientes e compactos (Chan, et al., 2013; Yu, et al., 2013)

No que se refere a trabalhos científicos publicados sobre desenvolvimento de sistemas de refrigeração com apoio solar destacam-se as seguintes publicações:

Ward e Löf em 1975<sup>1</sup> mencionaram pela primeira vez um sistema com a capacidade de aquecer e refrigerar um edifício residencial recorrendo à utilização de energia solar. Em 1976 os mesmos autores mencionavam num outro artigo<sup>2</sup>, que o equipamento mencionado anteriormente, com a capacidade de aquecimento e refrigeração, se tornou operacional a 1 de julho de 1974, e que de 1 de agosto do mesmo ano até 13 de janeiro de 1975, aproximadamente 40% da carga de refrigeração foi fornecida por energia solar. Em 1978<sup>3</sup> mencionaram que a conjugação de um refrigerador convencional com um sistema de absorção residencial de LiBr, tendo os autores referido que a alteração melhorava as condições de funcionamento do subsistema de refrigeração e o coeficiente de desempenho (COP) médio sazonal do sistema de arrefecimento sem, contudo, a terem quantificado.

Van Hattem e Dato (1981) caracterizaram o desempenho de um sistema de refrigeração por absorção a energia solar, usando como par de trabalho o H<sub>2</sub>O-LiBr com uma capacidade de refrigeração de 4 kW que era utilizado para a produção de água quente num edifício localizado em Ispra, Itália. Os autores verificaram que o equipamento apresentava um COP de 0,54 (Hattem e Dato, 1981).

Ali e coautores (2008), para além de um extenso levantamento bibliográfico sobre equipamentos de refrigeração de absorção, desenvolveram uma unidade de refrigeração de efeito simples que tinha como par de trabalho o LiBr-H<sub>2</sub>O, e consequentemente uma baixa temperatura de operação (Ali, et al., 2008).

---

<sup>1</sup> Ward, D.S., Löf, G.O.G., 1975. Design and construction of a residential solar heating and cooling system. *Solar Energy* 17 (1), 13–20, citado em (Ali, et al., 2008)

<sup>2</sup> Ward, D.S., Weiss, T.A., Löf, G.O.G., 1976. Preliminary performance of CSU Solar House I heating and cooling system. *Solar Energy* 18 (6), 541–548, citado em (Ali, et al., 2008)

<sup>3</sup> Ward, D.S., Löf, G.O.G., Uesaki, T., 1978. Cooling subsystem design in CSU solar house III. *Solar Energy* 20 (2), 119–126 citado em (Ali, et al., 2008).

Em 2000, Arun e coautores analisaram o desempenho de um sistema de refrigeração de absorção de efeito duplo, que utilizava o brometo de lítio como absorvente e a água como refrigerante. Os autores analisam e comparam os sistemas de absorção que operam em série e em paralelo, constatando que o COP para a configuração em paralelo é ao da configuração em série (Arun, et al., 2000) .

Em 2002 Martínez e Pinazo desenvolveram um modelo estatístico de previsão da eficiência do equipamento, com o objetivo de melhorar uma unidade de refrigeração de absorção de efeito simples, que utilizava como par de fluido de trabalho o LiBr-H<sub>2</sub>O. Realizaram vários estudos experimentais e mediram os efeitos da variação da área dos permutadores de calor na eficiência do equipamento, tendo concluído que a otimização do processo de transferência de calor nos permutadores podia levar a um melhoramento do COP em cerca de 10%, sem variar a capacidade nominal do sistema, nem a área total de transferência de calor (Matínez e Pinazo, 2002).

Bong e coautores em 1987 projetaram e instalaram um refrigerador de absorção solar, em Singapura, com uma potência de 7 kW. Esta unidade tinha uma capacidade de refrigeração média global de 4 kW e um COP de 0,58 (Bong, et al., 1987).

Al-Karaghoulí e coautores em 1991 apresentaram os resultados da operação de um sistema de refrigeração solar instalado no centro de pesquisas de energia solar do Iraque, que, à data, foi considerado o maior sistema de refrigeração solar. O sistema de refrigeração solar era constituído por dois chillers de absorção com uma potência cada um de 211, 02 kW e dois tanques de armazenamento térmico com 15 m<sup>3</sup>, cinco torres de refrigeração com vários sistemas de *backup*. Este sistema apresentava um COP de 0,618 (Al-Karaghoulí, et al., 1991).

Yeung e coautores em 1992 construíram e implementaram, em Hong Kong, um sistema de refrigeração de absorção solar com uma capacidade de refrigeração de 4,7 kW. Este sistema apresenta uma eficiência global de 30,5%, uma capacidade nominal de arrefecimento de 25 kW, um COP de 0,63 (Yeung, et al., 1992)

Best e Ortega em 1999 compilaram os resultados de uma unidade de refrigeração que se encontrou operacional de 1983 à 1986 no México. A unidade operava com o par de trabalho LiBr-H<sub>2</sub>O e apresentou uma fração de aquecimento solar anual de 75% e uma eficiência do refrigerador de 0,73 (Best e Ortega, 1999).

Storkenmaier e coautores<sup>4</sup> em 2003 relataram o desenvolvimento de um refrigerador de absorção com uma capacidade de 10 kW e um COP de 0,74. Kim refere, ainda, um sistema de refrigeração de absorção com 16 kW e um COP de 0,75, desenvolvido por Safarik e coautores em 2005<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> Storkenmaier, F., Harm, M., Schweigler, C., Ziegler, F., Albers, J., Kohlenbach, P., Sengewald, T., 2003. Small-capacity water/LiBr absorption chiller for solar cooling and waste-heat driven cooling. In: Proceedings of the International Congress of Refrigeration, Washington, DC, USA citado em (D.-S Kim, 2007).

<sup>5</sup> Safarik, M., Richter, L., Mockel, F., Kretschmar, S., 2005. Performance data of a small capacity absorption chiller. In: Proceedings of the International Conference on Solar Air-conditioning, Bad Staffelstein, Germany citado em . (D.-S Kim, 2007)

Horuz e Callande realizaram em 2004 uma análise detalhada a um sistema de refrigeração por absorção a vapor concebido para produzir água gelada, com a finalidade de a utilizar num sistema de condicionamento de ar. Esta unidade utiliza o  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  como par de trabalho e apresenta uma potência de refrigeração de 10 kW. Devido ao ponto de congelação do par de trabalho, os autores utilizaram uma solução anticongelante ( $\text{H}_2\text{O}$ - etilenoglicol) para que o sistema funcionasse abaixo do ponto de congelação da água (Horuz e Callande, 2004)

Syed e coautores realizaram, em 2005, uma descrição pormenorizada do estudo de um sistema de refrigeração de absorção de efeito simples de  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  com uma capacidade e refrigeração de 35 kW que foi testado experimentalmente em Madrid durante o período do Verão de 2003. O COP médio diário foi de 0,42 (Syed, et al., 2005).

Zambrano e coautores (2007) apresentaram resultados de uma unidade de refrigeração de absorção solar implementada em Sevilha. A unidade é constituída por um conjunto de coletores solares planos com uma área total de  $151 \text{ m}^2$ , um tanque de armazenamento de água quente de  $2,5 \text{ m}^3$  e um sistema de aquecimento auxiliar a gás, apresentando uma capacidade de refrigeração de 35,17 kW (Zambrano, et al., 2007).

Kaynakli e Kilic em 2007 realizaram uma análise termodinâmica detalhada do ciclo de refrigeração por absorção de  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ . Ao investigarem a influência da temperatura de funcionamento e da eficiência do permutador de calor sobre o coeficiente de desempenho (COP), concluíram que a eficiência do permutador e o coeficiente de desempenho aumentam com o aumento da temperatura do gerador e do evaporador, diminuindo com o aumento da temperatura do condensador e do absorvedor.

Os investigadores realizaram, também, um estudo sobre o efeito da variação da eficiência dos dois permutadores associados à troca de calor coma solução aquosa de  $\text{LiBr}$  e com o refrigerante. Concluíram que a eficiência do permutador de calor do refrigerante tem maior efeito no sistema, tendo verificado que este permutador permite aumentar o COP na ordem dos 40 %, de 0,57 para 0,82, enquanto que o permutador do refrigerante apenas possibilita um aumento de COP de 2,8 %, de 0,57 para 0,58 (Kaynakli e Kilic,2007)

Rosiek e Batlles em 2009 apresentaram uma análise do comportamento do sistema de refrigeração de absorção de efeito instalado num edifício, que operava com o par de trabalho  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ . Os autores avaliaram diferentes modos de operação do sistema, e a variação do coeficiente de desempenho consoante a variação das temperaturas do gerador, do absorvedor, do condensador e do evaporador. Os dados foram recolhidos durante um ano, sendo os valores médios do coeficiente de desempenho e da capacidade de refrigeração calculados apenas para os meses de verão, de 0,6 e 40 kW, respetivamente. (Rosiek e Batlles, 2009).

Cuizhen Zhang e coautores em 2011 realizaram uma pesquisa sobre uma nova técnica de recuperação de calor numa bomba de calor de  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ , cujo sistema tem a capacidade de recuperar o calor que a solução de brometo de lítio perde no



processo de refrigeração. Com esta pesquisa os autores concluíram que o sistema de refrigeração é estável e flexível e apresenta um COP 1,12. Ao comparar este sistema com o sistema de ar condicionada tradicional, verificou-se um melhoramento na taxa de utilização, mas a sua alta eficiência energética depende se a necessidade de calor, energia e refrigeração é constante ao longo do ano (Zhang, et al., 2011).

Marc e coautores, em 2010, apresentaram um estudo experimental de um sistema de refrigeração de absorção solar de efeito simples sem acumulação térmica, com a capacidade de refrigerar quatro salas de aula nas Ilhas *Reunion*, perto do Trópico de Capricórnio, que operava com o par de trabalho LiBr-H<sub>2</sub>O e com uma capacidade de refrigeração de 30 kW. Este estudo pretende definir os limites do uso do sistema, sem definir uma temperatura de referência, tendo-se obtido, para o período entre março e junho, os valores de COP entre 0,30-0,42 e uma capacidade de refrigeração mensal que varia entre os 455 – 830 kWh (Marc, et al., 2010). Em 2011 Praene e coautores, partindo do trabalho anterior, apresentam um estudo onde simulam os resultados da unidade através de um programa informático e os comparam com os resultados experimentais. (Praene, et al., 2011).

Em 2012 Marc e coautores retomaram novamente a investigação da unidade iniciada em 2010 (Marc, et al., 2010), ao desenvolveram um modelo matemática que previa o desempenho da unidade de refrigeração. Com esta análise verificaram que eram apenas necessários seis parâmetros para modelar o sistema. Ao compararem os resultados obtidos pelo modelo matemático com os resultados obtidos experimentalmente ao longo de dois anos em termos de capacidade de refrigeração e de COP obtiveram um erro de apenas 5 %, tendo, por isso, sugerido que o programa poderia ser utilizado para detetar desvios no desempenho de instalações à escala real. (Marc, et al., 2012).

Oberweis e Al-Shemmeri em 2012 apresentam um modelo matemático que avaliava o desempenho de um sistema de refrigeração de absorção, que utiliza como fonte de energia o sol e a biomassa. Os dados experimentais de entrada do modelo são os caudais do refrigerante e as diferentes temperaturas. O programa permite determinar o COP, possibilitando a otimização do processo como função da temperatura da fonte de calor. A validação do modelo com um piloto experimental permitiu avaliar a sua adequabilidade, tendo-se obtido um desvio de 10%. Os autores concluíram também que a combinação da energia solar com a biomassa é particularmente indicado para países com elevada exposição solar (Oberweis e Al-Shemmeri, 2012).

Çağlar e Yamali em 2012 analisaram uma bomba de calor com apoio solar, com o objetivo de maximizar o COP. A unidade experimental consiste num sistema de aquecimento solar, do que faz parte um coletor solar, um tanque de armazenamento de água quente e uma bomba de circulação; e de um sistema de compressão de vapor que é constituído por um evaporador colocado no reservatório de armazenamento, um condensador colocado na sala a ser aquecida, um compressor e um dispositivo de expansão apresentando valores de COP teóricos, experimentais e globais do sistema são 6,33, 6,38 e 5,56, respetivamente, com uma capacidade de

refrigeração de 4,95 kW. (NOTA: Os valores de COP, neste artigo, são calculados pelo quociente entre o calor transferido no condensador e a diferença entre os calores transferidos no condensador e no evaporador; (Çağlar e Yamali, 2012)

Os investigadores da equipa de N'Tsoukpoe (2012) apresentaram a configuração e os resultados experimentais do processo de refrigeração e de regeneração da solução de uma unidade que opera com LiBr-H<sub>2</sub>O como par de trabalho e uma potência de refrigeração de 1 kW. Os autores constataram que o processo de absorção permitia o aquecimento de uma habitação (N'Tsoukpoe, et al., 2012).

Lizarte e coautores em 2012 desenvolveram um protótipo de um refrigerador de absorção de efeito simples, que tinha como par de trabalho o LiBr-H<sub>2</sub>O. Este protótipo apresenta uma potência de 4,5 kW e um COP de refrigeração de 0,27 (Lizarte, et al., 2012) .

Os investigadores Borge-Diez e coautores em 2012 realizaram um estudo real com um sistema de refrigeração de absorção triplo a energia solar, que utiliza como par de trabalho o LiCl-H<sub>2</sub>O. A unidade foi implementada numa habitação residencial, que continha uma piscina que era utilizada como dissipador de calor da unidade em causa. Os dados foram recolhidos durante o período de um ano, tendo sido comparados com dados teóricos. Da análise dos dados os autores verificaram que para o período em análise se observou valores de COP experimentais distintos dos estimados teoricamente, que a potência de arrefecimento experimental é inferior à potência teórica exceto para as últimas horas do dia, tendo-se concluído que o sistema era inadequado para satisfazer as necessidades de arrefecimento do edifício (Borge-Diez, et al., 2012).

Yin e coautores em 2012 realizaram um investigação experimental sobre um refrigerador solar de absorção com diferentes modos de refrigeração, centrando-se principalmente no desempenho de sistemas integrados, incluindo um refrigerador de absorção de efeito simples, que utiliza como par de trabalho LiBr-H<sub>2</sub>O. Este sistema apresenta uma potência de arrefecimento de 4,5 kW, obtida durante o período de operação, que se assume como o período de exposição a radiação solar, de nove horas, variando o COP entre os 0,25-0,38 (Yin, et al., 2012).

Gomr em 2010 investigou o potencial da aplicação de LiBr-H<sub>2</sub>O de efeito simples, duplo e triplo para a produção de água gelada. Constataram que o COP do ciclo aumenta com o aumento da temperatura do gerador e do evaporado, mas diminui com o aumento da temperatura do condensador. O COP de efeito simples para o arrefecimento varia entre 0,73-0,79, para o efeito duplo entre 1,22-1,42 e para sistemas de efeito triplo entre 1,62-1,90 (Gomr, 2010).

Yu e coautores em 2014 propuseram e avaliaram um sistema de sorção trifásico para o armazenamento de energia térmica para fornecer frio no verão e calor no inverno. A inovação deste ciclo é que ele permite a cristalização da solução ou mesmo a desidratação durante a fase de regeneração. Neste estudo são pares de trabalho LiCl-H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O e LiBr-H<sub>2</sub>O e ao incluírem o processo de cristalização, constataram que o armazenamento de calor aumenta 43%, 79% e 38%,

respetivamente para cada par de trabalho (Yu, et al., 2014). Os autores concluíram, ainda, que o  $\text{LiCl-H}_2\text{O}$  constitui a melhor opção entre os três pares de trabalho estudados, pois apresenta uma densidade de armazenamento a frio de  $519 \text{ kWh/m}^3$  e uma densidade de armazenamento de calor de  $618 \text{ kWh/m}^3$  (Yu, et al., 2013; Yu, et al., 2014).

Flores e coautores em 2014 elaboraram um estudo que analisava seis pares de trabalho,  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ ,  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3\text{-NaSCN}$ ,  $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O-LiCl}$  E  $\text{H}_2\text{O-CaCl}_2$ , nas suas características termodinâmicas e propriedades termofísicas, capacidade energéticas, assim como a eficiência do sistema. Todos estes parâmetros foram estudados em locais com condições climáticas extremas como o Norte da República do México. Os autores concluíram que os pares  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$  e  $\text{H}_2\text{O-LiCl}$  têm um coeficiente de desempenho de aproximadamente de 0,8, operando como ar condicionado. Concluíram que o par  $\text{H}_2\text{O-LiCl}$  é o que apresenta maior COP, de 0,83, seguindo-se do  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$  para a mesma temperatura de  $85^\circ$ , o par com menor COP é o  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  de 0,53 para uma temperatura de  $120^\circ\text{C}$  (Flores, et al., 2014).

Parham e coautores em 2013 realizaram um estudo do desempenho termodinâmico de um refrigerador de absorção que utilizava como par de trabalho  $\text{H}_2\text{O-LiCl}$  e compararam-no a um refrigerador de absorção, nas mesmas condições, mas que utilizava como para de trabalho o  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ . Os resultados mostraram que o coeficiente de desempenho para o par  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$  era de 1,5% a 2% mais alto do que o coeficiente de desempenho para o par  $\text{H}_2\text{O-LiCl}$ . Por exemplo para uma temperatura de  $30^\circ\text{C}$  o par  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$  apresenta um COP de 0,8844, enquanto o par  $\text{H}_2\text{O-LiCl}$  apresenta um COP de 0,8788 (Parham, et al., 2013)

Hamdam e coautores em 2013 realizaram um estudo teórico de modo a investigarem o potencial de armazenamento de energia térmica e o efeito dos diferentes parâmetros do projeto (o tipo de sal, a quantidade de água no evaporador e a temperatura interna do sistema quantidade de água evaporada, temperatura inicial do sistema) sobre o aumento da temperatura do condensador e sobre o desempenho do sistema. Estes investigadores utilizavam uma bomba de calor que tinham como par de trabalho o par  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ , e compararam os seus resultados com os resultados de uma bomba de calor que utilizava como fluido de trabalho o par  $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ . Com este estudo verificaram que na fase inicial de operação da bomba ocorreu um aumento da temperatura inicial. Os autores verificaram que o cloreto de lítio tem uma maior capacidade de absorção do refrigerante em comparação com o cloreto de sódio, e consequentemente, apresenta maiores valores de coeficientes de desempenho comparativamente ao cloreto de sódio. Aumentando a quantidade de água a circular no sistema a capacidade de aquecimento e arrefecimento da unidade melhora (Hamdan, et al., 2013).

Rosato e Sibilio em 2013 caracterizaram experimentalmente uma bomba de calor de absorção trifásica, que tinha como par de trabalho  $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ . Este sistema é composto por duas unidades idênticas que operam em conjunto, sendo cada uma delas

constituídas por quatro vasos diferentes: o reator (absorção/adsorção), o condensador/evaporador, e dois reservatórios, um para a solução e outra para a água. Esta unidade apresenta vários modos de operação, mas neste estudo só foram analisados dois deles, os modos normal e duplo. O COP para o modo normal foi de 0,6, enquanto para o modo duplo, contrariamente ao expectável, foi substancialmente pior, não apresentando os autores o correspondente valor. Constataram, também, que o sistema proposto permite uma redução do consumo de energia primária, das emissões de dióxido de carbono e dos custos de funcionamento em aproximadamente 70% (Rosato e Sibilo, 2013)

Pelo estudo dos artigos anteriormente listados pode-se concluir que de uma forma geral as unidades de refrigeração por absorção com apoio solar constituem uma boa opção para regiões com elevada exposição solar que não dispõem de energia elétrica, conforme era objetivo do presente projeto. Constatou-se, também, que a solução de cloreto de lítio constitui um dos melhores pares de trabalho das unidade de refrigeração por absorção pois permite obter melhores coeficientes de desempenho e apresenta menos desvantagens, comparativamente com outras soluções salinas utilizadas noutros estudos, nomeadamente ao nível da corrosão imposta à instalação. Desta forma, optou-se por adotar no presente projeto um sistema de refrigeração por absorção usando como par de trabalho o cloreto de lítio, tendo-se seguido na sua conceção um sistema patenteado que a seguir se descreve.

Em 2007 a empresa sueca *Climatewell* desenvolveu uma patente (Olsson, 2007), que difere dos restantes sistemas de refrigeração no facto de operar em três fases: sólido, líquido e vapor, possuindo a capacidade de armazenar de forma eficiente e integrada energia na forma sólida. A capacidade de armazenamento de energia é uma grande vantagem, pois é possível o processo de refrigeração ou de aquecimento de modo contínuo na ausência de radiação solar (Borge-Diez, et al., 2012), ao contrário dos sistemas de refrigeração tradicionais que apenas utilizam as fases líquida e gasosa tendo, por isso, uma capacidade de armazenar energia reduzida. Devido a esta característica este equipamento pode ser denominado de acumulador termoquímico (Xu, et al., 2011; Borge, et al., 2011).

Este protótipo já se encontra atualmente no mercado, encontrando-se instalado no laboratório de uma universidade de Nápoles (Rosato e Sibilio, 2013). O sistema, é composto por duas unidades idênticas que operam em simultâneo, sendo estas constituídas por dois reservatórios: um contendo a solução salina tem a função de absorvedor / concentrador (reator) e o outro, com o refrigerante – água, desempenha a função de um condensador / evaporador. Estas unidades alternam as suas funções entre o processo de refrigeração e de regeneração.

Esta unidade opera em ciclo fechado sob vácuo (Rosato e Sibilio, 2013) e tem dois permutadores de calor, um ligado ao reator e outro ligado ao condensador / evaporador. Estes sistemas permitem a regeneração uma vez que a solução binária e

o refrigerante são bombeados a partir dos recipientes de armazenamento ao longo dos permutadores de calor, retornando aos tanques de armazenamento por gravidade.

Durante a fase de regeneração da solução diluída o reator é ligado aos painéis solares, a fim de regenerar a solução binária diluída, sendo fornecido calor à solução pelo permutador de calor que se encontra associado ao reator. Neste processo, quando se atinge o ponto de saturação formam-se cristais que caem por gravidade para o interior do vaso, sendo depois transferidos para o depósito de armazenamento, onde se forma uma espécie de lama no fundo do depósito, de forma a não seguirem na solução. Caso os cristais ficassem suspensos na solução, ao passar na bomba depositar-se-iam originando perdas de carga na bomba. Simultaneamente o evaporador / condensador é ligado ao dissipador de calor (por exemplo uma piscina), para permitir o arrefecimento do refrigerante.

Durante a fase de refrigeração o reator é ligado ao dissipador de calor, enquanto o condensador / evaporador está ligado ao circuito de refrigeração. A solução saturada é bombeada através do permutador de calor no reator onde absorve o refrigerante evaporado, tornando-se cada vez mais diluída. A solução diluída é enviada para o tanque onde se encontra armazenada a lama de cristais do sal a fim de a concentrar, uma vez que ao fazer-se passar a solução diluída pela lama de cristais salinos, estes vão-se dissolver na solução, que passa a estar concentrada e é, então, armazenada.

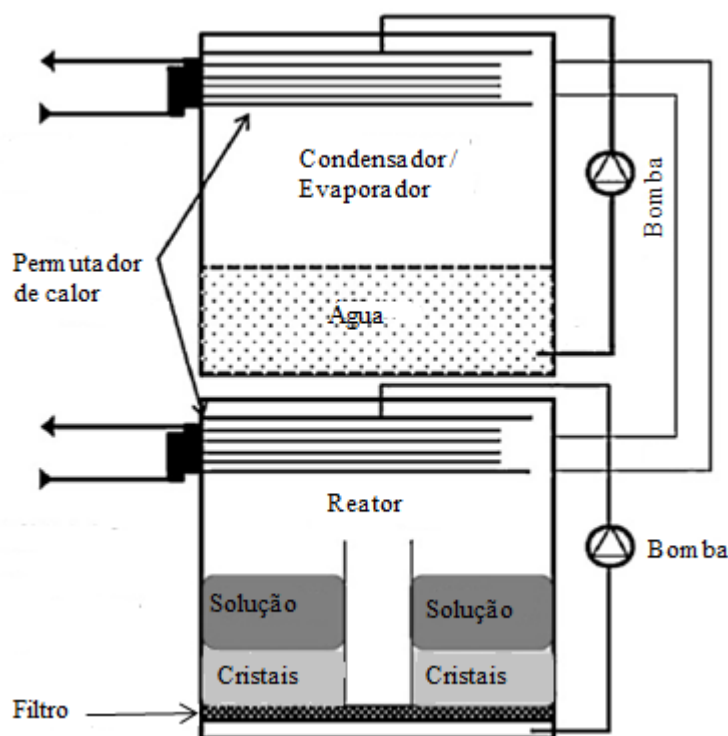


Figura 1.4.1 – Ilustração da unidade real da unidade *Climatwell* (adaptado de Borge *et al.*, 2011).

O estudo realizado teve como base, esta patente sueca, tendo sido desenvolvida uma unidade de refrigeração que se baseou em alguns aspetos desta unidade. Assim, a unidade desenvolvida também se baseou no par de trabalho  $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ , embora tenha incidido apenas no processo de absorção, não tendo contemplado a adsorção. Outra grande diferença residiu no facto da regeneração da solução salina diluída ter sido realizada em sistema descontínuo e não contínuo como acontece na unidade patenteada e, naturalmente, teve uma dimensão e capacidade diferentes da unidade da patente sueca. A descrição da unidade em estudo e os seus resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

## **2. Materiais e métodos**

Neste capítulo serão apresentados os materiais e as metodologias usadas para a implementação dos ensaios experimentais realizados. Serão descritos os ensaios preliminares com vista à otimização da unidade de refrigeração laboratorial por absorção desenvolvida. Posteriormente, será apresentada a forma de proceder à regeneração da solução aquosa de cloreto de lítio usada no sistema de absorção. Por fim, será apresentado o método usado para quantificar a concentração das soluções aquosas de cloreto de lítio, baseado no método de *Mohr*.





## 2.1. Unidade de refrigeração

A principal unidade de refrigeração utilizada no desenvolvimento do presente trabalho baseia-se numa proveta contendo uma solução concentrada de LiCl, na qual é borbulhada uma corrente de ar húmido que resulta do borbulhamento do ar em recirculação numa segunda proveta contendo água. A recirculação do refrigerante (água) é promovida por uma bomba. A proveta com água é colocada num banho termostatizado que simula o compartimento que se pretende arrefecer. A remoção de calor ocorre pela vaporização de água para a corrente de ar seco que borbulha na proveta. Na solução de LiCl, dá-se a absorção do vapor de água e a consequente remoção da humidade do ar, que pode ser recirculado seco à coluna de água, por meio da bomba. Desta forma cria-se um circuito de refrigeração que permite remover calor de uma fonte quente, usando um circuito fechado do refrigerante que muda de fase. A descrição detalhada desta instalação será efetuada mais à frente no subcapítulo 2.1. O objetivo do trabalho consistiu em estudar este processo e avaliar a sua capacidade de ser utilizado na prática.

Para simular o ambiente a refrigerar recorreu-se a um tanque com água que continha uma cabeça de aquecimento termostatizado, com oscilações de temperatura de  $\pm 1^\circ \text{C}$ . No interior do tanque foi imersa a proveta que continha água (o refrigerante) e do lado de fora (à temperatura ambiente) encontrava-se a proveta com a solução concentrada de cloreto de lítio. Numa unidade de refrigeração implementada numa fase inicial do projeto, a transferência do refrigerante (gasoso) ocorria naturalmente (por difusão). Face à lentidão observada neste conjunto de experiências optou-se por intensificar a transferência de massa promovendo o borbulhamento da corrente gasosa contendo o refrigerante (ar húmido) na solução aquosa de cloreto de lítio e simultaneamente, da corrente gasosa (ar seco) na coluna de água. Para o efeito recorreu-se a uma bomba de recirculação.

No primeiro grupo de experiências, em que a transferência de massa ocorria essencialmente por difusão foi monitorizada apenas uma parte do processo, o de evaporação do refrigerante, medindo-se a variação de volume da água no interior da proveta ao longo do tempo. Através deste registo a taxa de evaporação era determinada para calcular a taxa de calor retirada do meio. Como não se monitorizou o processo posterior de regeneração da solução de cloreto de lítio, não foi possível determinar a taxa de potência calorífica envolvida neste processo e subsequentemente calcular o COP para os ensaios realizados.

No segundo grupo de experiências, em que se utilizou a bomba de recirculação do refrigerante para promover a transferência de massa por convecção forçada, passou-se, a partir de um determinado momento, a monitorizar adequadamente os dois processos envolvidos no circuito de refrigeração: o primeiro processo que

consiste na evaporação do refrigerante e um segundo processo onde é efetuada a regeneração da solução aquosa de cloreto de lítio. Foram usados dois métodos na regeneração da solução aquosa de cloreto de lítio. Numa das metodologias usadas, o aquecimento da solução era direto, usando uma placa de aquecimento, que apesar de ser um processo mais rápido não permitia o registo da temperatura da solução e da variação do volume da solução, o que dificultou os cálculos do calor transferido e, conseqüentemente do COP do processo. Posteriormente, foi usado um outro modo de aquecimento, usando um banho-maria, com temperatura de aproximadamente 95 - 96 ° C, onde a proveta com a solução aquosa de cloreto de lítio a concentrar era imersa, havendo o cuidado para que esta ficasse completamente coberta pela água de aquecimento.

Depois de otimizada a unidade de refrigeração laboratorial, com a fase de evaporação do refrigerante e a fase de regeneração da solução de cloreto de lítio, assim como as condições de funcionamento, foi possível calcular o COP, pois registavam-se as variações do volume e da temperatura em função do tempo durante as duas fases do processo, o que permite estimar as taxas de calor de regeneração do absorvente e de evaporação do refrigerante.

Nos subcapítulos seguintes ir-se-á descrever os materiais e a metodologia usada no grupo de experiências realizadas com borbulhamento, compostas pela fase de evaporação e de regeneração, e com base nas quais se obtiveram os resultados tratados neste projeto.

Previamente ao grupo de experiências desenvolvidas com auxílio da bomba de recirculação de refrigerante, utilizou-se, conforme se referiu anteriormente, um sistema de arrefecimento baseado na difusão do refrigerante. Para o efeito, usaram-se dois matrizes, um com a solução aquosa de cloreto de lítio e outro com água, que foram ligados através de um tubo com diâmetro pequeno. Ao matraz com água foi fornecido calor através de um banho termostaticado para simular o efeito de um ambiente quente que se pretende refrigerar. Como a área aberta à transferência de massa (a secção reta do tubo de ligação entre os dois matrizes) e a concentração da solução de cloreto de lítio eram pequenas, o processo de difusão de vapor de água nestas condições era tão lento que a unidade de refrigeração se revelou ineficaz.

Pensou-se, então, com o objetivo de intensificar a difusão do refrigerante, aumentar-se tanto o diâmetro do tubo de ligação como a concentração da solução aquosa de cloreto de lítio. Usando uma solução aquosa saturada de cloreto de lítio repetiu-se o procedimento, mas verificou-se que o processo de difusão continuava ainda muito lento, impossibilitando o registo de variações significativas de volume de água no matraz durante períodos de tempo aceitáveis. Decidiu-se, então, elevar ainda mais o diâmetro do tubo e, portanto, aumentar a área aberta à transferência de massa. Ao fazê-lo foi inevitável aumentar também o comprimento do tubo (o percurso da

difusão), pelo que o processo de difusão se manteve lento. Alterando o material inicial do tubo para um material moldável ao calor foi possível reduzir, o comprimento do tubo, aumentando inclusivamente o diâmetro do tubo. Com esta nova configuração da unidade de refrigeração foi possível realizar alguns ensaios preliminares, mas devido a um acidente esta unidade ficou inoperacional e não se conseguiu voltar a reproduzir a sua construção. Sendo assim, optou-se por abandonar esta unidade de refrigeração e usar só a unidade de refrigeração em que se usou uma bomba para promover a circulação do refrigerante (gasoso) e que foi já referida anteriormente.

Nas secções seguintes serão apresentados em mais detalhe os dois processos envolvidos nesta unidade de refrigeração laboratorial com borbulhamento que foi desenvolvida: o processo de evaporação do refrigerante e o processo de regeneração do absorvente (a solução de cloreto de lítio).

### **2.1.1. Processo de evaporação**

Nesta secção vai-se enumerar o material e descrever a metodologia utilizados no processo de evaporação do refrigerante (de arrefecimento), assim como os cálculos necessários para a determinação do calor necessário para a evaporação, que corresponderá ao calor removido do meio a arrefecer.

#### **Material:**

- Provetas de 500 mL;
- Bomba para recirculação do refrigerante (água);
- Tubo de cristal com diâmetro de 6 mm ( $\Phi 6 \times 8$ );
- Rolhas de cortiça;
- Banho termoestatizado Julabo;
- Termómetro;
- Cronómetro;
- Placa de agitação IKAMAG RH;
- Cloreto de lítio.

#### **Metodologia:**

Para a preparação da solução saturada de cloreto de lítio, adicionando lentamente o cloreto de lítio num copo de diluição com aproximadamente 50 mL de água. Para facilitar a dissolução do sal colocou-se o copo numa placa de agitação. Quando o sal adicionado permanecia na fase sólida assumia-se que a solução ficava saturada em cloreto de lítio.

Numa proveta colocava-se a solução de cloreto de lítio preparada e noutra proveta era introduzida água (300 - 400 mL). As provetas com os respetivos líquidos eram posteriormente tapadas com rolhas de cortiça contendo dois orifícios que permitiram

introduzir dois tubos, um colocado no fundo da proveta para prover o borbulhamento da corrente gasosa e outro, mais curto, para permitir a saída da corrente gasosa, conforme se pode visualizar no esquema apresentado na Figura 2.1.1. Houve o cuidado de isolar o sistema por forma a não ocorrerem fugas. Assim, um dos tubos foi usado para permitir a circulação do refrigerante (gasoso), e o outro tubo permitiu a circulação, em sentido oposto, ou seja, da atmosfera com uma baixa pressão de vapor de água que existe na proveta com o absorvente, sendo este o circuito promovido pela bomba. Através da rolha de cortiça existente na proveta da solução de cloreto de lítio colocou-se um termómetro, que permitiu monitorizar a temperatura ao longo do processo.

O banho termostatzado, usado para simular a divisão a arrefecer, foi entretanto ligado para que a água aquecesse até à temperatura pretendida e que variou de acordo com as experiências.

Depois de a temperatura ter estabilizado no valor pretendido, colocou-se a proveta com água no banho termostatzado que já se encontrava ligada à proveta com a solução de cloreto de lítio no exterior do banho. A Figura 2.1.1 apresenta um esquema da unidade de refrigeração descrita, composta pelas duas provetas, uma que continha água e a outra com uma solução aquosa binária saturada de cloreto de lítio.

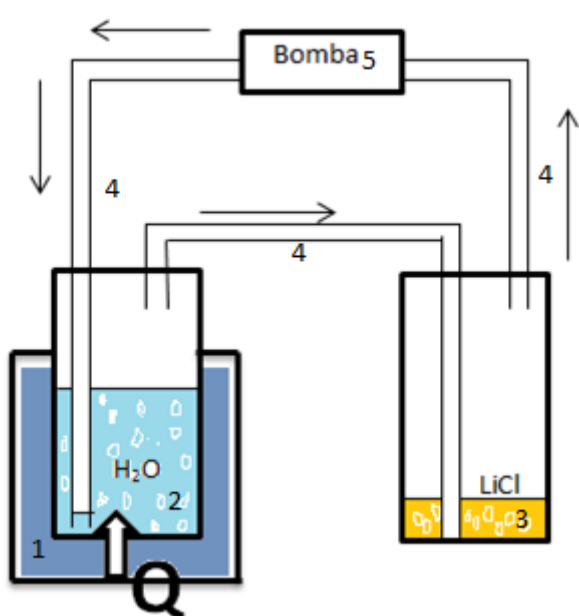


Figura 2.1.1 – a) Esquema do processo de evaporação da unidade de refrigeração; b) Processo de evaporação da unidade de refrigeração de absorção com a bomba de circulação.

Na Figura 2.1.1 b) encontra-se uma fotografia do sistema de evaporação usado na unidade de refrigeração laboratorial implementada.

Legenda:

- 1 – Tanque de água;
- 2 – Proveta de água;
- 3 – Proveta de cloreto de lítio;
- 4 – Tubagem;
- 5 – Bomba de recirculação.

Antes de se iniciar uma experiência houve sempre o cuidado de verificar a ausência de fugas no sistema.

Após o início de uma experiência, era registada a evolução do volume da solução aquosa de cloreto de lítio, assim como o decréscimo do volume de água na outra proveta ao longo do tempo. Ao comparar a variação do volume de água com a variação do volume da solução de cloreto de lítio durante uma experiência, era possível controlar a existência de fugas no sistema.

Nestas experiências, com a introdução da bomba para promover a circulação do refrigerante gasoso para a proveta com a solução aquosa de cloreto de lítio, a transferência de massa foi intensificada e a variação de volume do líquido em ambas as provetas era visível ao fim de um período de tempo razoável.

Terminada uma experiência de evaporação, os registos da variação do volume de água na proveta ao longo do tempo eram usados para determinar o caudal volumétrico de água evaporada ( $\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ , em m<sup>3</sup>/s) e, consequentemente o caudal mássico de evaporação. Depois, usando o valor do calor latente de evaporação ( $\lambda_{H_2O}$ , em kg/kJ) para as condições usadas, era possível determinar a potência calorífica ( $\dot{Q}_{evaporação}$ , em W) envolvida no processo de evaporação, usando a Equação (3).

$$\dot{Q}_{evaporação} = \dot{V}_{H_2O}^{Evap} \rho_{H_2O} \lambda_{H_2O} \quad (3)$$

Sendo o  $\rho_{H_2O}$  a massa volúmica da água (em kg/m<sup>3</sup>) à temperatura de evaporação.

Terminado o processo de evaporação, procedia-se à regeneração da solução aquosa de cloreto de lítio diluída durante este processo. O método de regeneração da solução e respetivos cálculos serão apresentados no subcapítulo seguinte.

### 2.1.2. Unidade de regeneração

A regeneração da solução diluída de cloreto de lítio foi, inicialmente, feita por aquecimento direto da solução, tal como foi referido anteriormente. Apesar do processo de regeneração ser rápido não se conseguiu uma temperatura constante ao longo do tempo, o que dificultava os cálculos. Optou-se, então, por usar um banho-maria com temperatura constante e registar a variação de volume da solução ao longo do tempo. Houve sempre o cuidado de garantir que a solução de cloreto de

lítio no interior da proveta estava coberta de água do banho-maria. Para a regeneração da solução foi utilizado o material enumerado abaixo.

**Material:**

- Copos de diluição de 2000 mL ou superior;
- Termómetro;
- Magneto;
- Relógio;
- Placa de aquecimento.

**Metodologia:**

Colocou-se água no interior do copo de diluição com o magneto e dentro do copo introduziu-se a proveta com a solução de cloreto de lítio. O termóstato da placa de aquecimento era regulado para manter a água a cerca de 96 ° C, com a agitação ligada para promover a circulação da água. A variação do volume era registada ao longo do tempo, e o processo era interrompido quando o volume inicial da solução de cloreto de lítio usada no processo de evaporação era atingido. Na Figura 2.1.2 está ilustrada a etapa de regeneração da solução de cloreto de lítio proveniente do processo de evaporação.



Figura 2.1.2 – Ilustração do processo de regeneração da solução aquosa de cloreto de lítio.

Após a regeneração da solução pode-se calcular a potência calorífica envolvida no processo, parâmetro necessário para o cálculo do COP da unidade de refrigeração. Admitindo que o cloreto de lítio é não volátil, com a variação do volume da solução ao longo do tempo é possível determinar a taxa mássica de evaporação da água da solução e, assim, determinar o calor necessário ( $\dot{Q}_{\text{regeneração}}$ , em W), por unidade de tempo, durante o processo de regeneração através da Equação (4).

$$\dot{Q}_{regeneração} = \dot{V}_{H_2O}^{Evap} \rho_{H_2O} \lambda_{LiCl} \quad (4)$$

Para determinar este parâmetro, há a necessidade de saber algumas propriedades físicas da solução binária de cloreto de lítio, nomeadamente o calor latente de vaporização da solução do sal,  $\lambda_{LiCl}$  que variam com a concentração da solução e a temperatura a que esta se encontra.

O estudo desenvolvido por (Conde, 2004), contém várias correlações e gráficos para a determinação de propriedades físicas e termodinâmicas para o sistema em causa. Foram, assim, utilizadas correlações empíricas para os cálculos das propriedades necessárias, tendo por base o trabalho de (Conde, 2004), que se passam a apresentar.

Para a determinação do calor latente de vaporização da solução de cloreto de lítio  $\Delta h_d$  foi necessário calcular a variação da entalpia de diluição pela equação ( 5). O valor obtido seria depois somado ao calor latente de vaporização da água pura à temperatura da solução binária.

$$\Delta h_d = \Delta h_{d,0} \left[ 1 + \left( \frac{\zeta}{H_1} \right)^{H_2} \right]^{H_3} \quad (5)$$

Para a determinação de  $\zeta$  utilizou-se a equação ( 6), este parâmetro é definido como a fração da massa do sal, de acordo com o artigo (Conde, 2004).

$$\zeta = \frac{x_{LiCl}}{H_4 - x_{LiCl}} \quad (6)$$

E para a determinação de  $\Delta h_{d,0}$  utilizou-se a equação ( 7)

$$\Delta h_{d,0} = H_5 + H_6 \theta \quad (7)$$

Os parâmetros necessários para usar a Equação ( 5), ( 6) e ( 7) estão indicados na Tabela 2.1.1.

Tabela 2.1.1 - Parâmetros para a determinação da variação da entalpia de diluição da solução de cloreto de lítio.

$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	$H_6$
0,845	-1,965	-2,265	0,6	169,105	457,850

### 2.1.3. Coeficiente de desempenho

Com a fase de evaporação do refrigerante e a fase de regeneração da solução de cloreto de lítio completas, foi possível calcular o COP para a unidade de refrigeração laboratorial. Após o cálculo da potência calorífica consumida no processo evaporação e também da potência calorífica libertada no processo de regeneração, determina-se o COP, como apresentado na equação ( 8).

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\text{evaporação}}}{\dot{Q}_{\text{Regeneração}} + P_B} \quad (8)$$

A potência máxima da bomba dada pelo fabricante é de 60 W, possuindo uma potência útil de aproximadamente 39 W. A potência útil da bomba foi determinada por um medidor de potência.

## 2.2. Quantificação da concentração da solução absorvente

O método de *Mohr* foi utilizado para determinar a concentração de cloretos na solução diluída de cloreto de lítio que foi submetida ao processo de regeneração. A quantificação da concentração nas soluções foi feita em quintuplicado. O método encontra-se descrito no em detalhe no Anexo B.

A Tabela 2.2.1 apresenta a informação necessária para a determinação das concentrações das soluções de cloreto de lítio resultantes do processo de evaporação das experiências realizadas, sendo os parâmetros da tabela, o fator de diluição ( $f_{\text{Diluição}}$ ), o volume de amostra a analisar ( $V_{\text{amostra}}$ ), o volume gasto de nitrato de prata ( $V_{\text{AgNO}_3}$ ), assim como a sua média ( $\bar{V}_{\text{AgNO}_3}$ ) e as concentrações das soluções ( $c_{\text{Cl}^-}$ ) em estudo.

Tabela 2.2.1 – Informação referente à titulação das soluções de cloreto de lítio com nitrato de prata com uma concentração de 0,1 M, utilizando o método de *Mohr*.

Amostra	$f_{\text{Diluição}}$	$V_{\text{amostra}}$ (mL)	$V_{\text{AgNO}_3 \text{ 0,1 M}}$ (mL)					$\bar{V}_{\text{AgNO}_3}$ (mL)	$c_{\text{Cl}^-}$ (M)
1	1:333,3(3)	100	24,80		23,10		23,40	23,77	7,92
2	1:333,3(3)	100	25,80	26,40	25,30	25,90	26,60	26,08	8,69
3	1:333,3(3)	100	26,50	25,20	27,00	25,90	25,80	26,08	8,69



### **3. Resultados e Discussão**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na instalação laboratorial de arrefecimento por absorção, bem como o tratamento desses dados e a sua discussão. Inicialmente apresentam-se os resultados do processo de evaporação, e a representação gráfica dos resultados. Posteriormente analisam-se os resultados do processo de regeneração da solução absorvente e, por último, calcula-se a eficiência do processo global de refrigeração através da determinação dos valores de COP para todos os ensaios.



### 3.1. Resultados do processo de evaporação

Na instalação de refrigeração estudada a simulação da transferência de calor do compartimento onde se pretendia efetuar o arrefecimento com apoio solar era efetuada, conforme se descreveu no capítulo anterior, pelo processo de evaporação do fluido refrigerante (água) ocorrido na proveta colocada no banho termostatizado.

Neste estudo pretendia-se avaliar a velocidade de evaporação da água, através da monitorização da variação do nível de água na proveta com o tempo, o que permitia posteriormente calcular o calor removido no processo de evaporação,  $\dot{Q}_{\text{evaporação}}$ , expresso em W, e assim avaliar a eficiência do processo em estudo.

A Tabela 3.1.1 apresenta os resultados obtidos para cada ensaio, nomeadamente a temperatura do banho termostatizado em que se encontrava a proveta com água, onde ocorria o processo de evaporação ( $T$ , em  $^{\circ}\text{C}$ ), a concentração inicial ( $C_0^{\text{evap}}$ ) e final ( $C_f^{\text{evap}}$ ), da solução absorvente de cloreto de lítio, expressas em concentração molar, (M), o volume total de água evaporado ( $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{evap}}$ , em mL) e a duração ( $t$ , em min) de cada ensaio. Apresentam-se ainda os valores do caudal volumétrico médio no ensaio, ( $\dot{V}$ , em  $\text{m}^3/\text{s}$ ), e a taxa de calor removido do banho termostatizado pelo processo de evaporação ( $\dot{Q}_{\text{evap}}$  expresso em J/s ou W). No anexo A, apresentam-se os resultados destas experiências, discriminando-se a evolução de cada variável ao longo do tempo de experiência.

Tabela 3.1.1 – Resultados obtidos no processo de evaporação, a diferentes temperaturas, em que se utilizou duas bombas de circulação de ar com diferentes caudais, B1 com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min e B2 com um caudal de  $358 \pm 8,6$  l/min.

Ensaio	Bomba	T (°C)	$V_{H_2O}^{evap}$ (mL)	t (min)	$\dot{V} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	$C_0^{evap}$ (M)	$C_f^{evap}$ (M)
29/abr	B1	50	145	540	4,48	10,54	5,68	2,74
30/abr	B2	50*	65	477	2,02	5,35	12,79	6,14
03/jun	B1	50	210	583	6,00	14,31	12,04	2,85
19/mai	B2	50*	70	573	2,03	4,44	8,24	4,60
26/mai	B1	45	140	462	5,05	12,03	11,18	3,73
16/jun	B1	45*	175	423	6,90	16,43	14,23	3,40
15/set	B1	40	75	460	2,72	6,58	14,23	6,48
29/set	B1	40	260	1856	2,34	5,60	14,23	2,48
11/set	B1	35	165	1591	2,04	4,91	10,43	3,26
16/set	B2	35	130	1414	1,53	3,68	13,95	4,15
17/set	B2	35	165	1835	1,50	3,60	15,65	3,73
12/nov	B1	35	160	1463	1,82	4,38	15,35	3,65
12/nov	B1	35*	170	1580	1,79	4,31	14,23	3,48
17/nov	B1	35	150	1513	1,65	3,97	15,35	3,84
19/nov	B1	35	170	1422	1,99	4,79	11,18	3,26
2/nov	B1	35	160	1575	1,69	4,07	15,65	3,73
25/nov	B2	35	130	1532	1,35	3,26	17,05	4,38
27/nov	B2	35	165	1719	1,66	3,99	12,04	3,40
27/nov	B1	35*	140	1624	1,44	3,45	15,65	4,12
10/out	B2	30	110	1922	0,95	2,30	15,35	4,80
20/out	B2	30	110	1919	0,96	2,30	15,65	4,89
10/nov	B1	30	130	1774	1,22	2,94	8,69	3,56
02/jun	B2	30	105	1863	0,94	2,27	15,65	4,89

\* Nestas experiências ocorreu um problema no dispositivo de aquecimento do banho termostatzado, levando a que a sua temperatura não tenha sido mantida todo o tempo no valor pretendido

Desprezando as experiências em que ocorreram problemas no sistema de aquecimento verifica-se que no período total da experiência, de um modo geral nos ensaios em que se usou um valor mais elevado na temperatura do banho termostatzado, a transferência de calor é mais significativa, e, conseqüentemente, verifica-se uma maior quantidade de massa de água evaporada. Por outro lado, em cada conjunto de experiências realizado à mesma temperatura, quando se iniciou com uma concentração da solução absorvente mais elevada, também o processo de evaporação de água na coluna foi mais eficaz, em resultado da corrente gasosa proveniente da proveta que contém a solução de cloreto de lítio possuir um teor de água mais baixo.

Com vista a perceber melhor a forma como correu cada experiência serão apresentados de seguida os gráficos com os dados obtidos para cada temperatura

do banho termostatzado em estudo. Inicialmente serão analisados os dados obtidos para a experiência realizada a 35 °C, sendo posteriormente apresentados os restantes gráficos para as temperaturas de 30 °C, 40 °C, 45 °C e 50 °C.

Na Figura 3.1.1 encontra-se representada a evolução do volume de água evaporada em função do tempo de realização da experiência para a temperatura do banho termostatzado de 35 °C, quer para a bomba B1, quer para a bomba B2, sendo posteriormente os ensaios separados de acordo com a bomba utilizado para melhor análise.

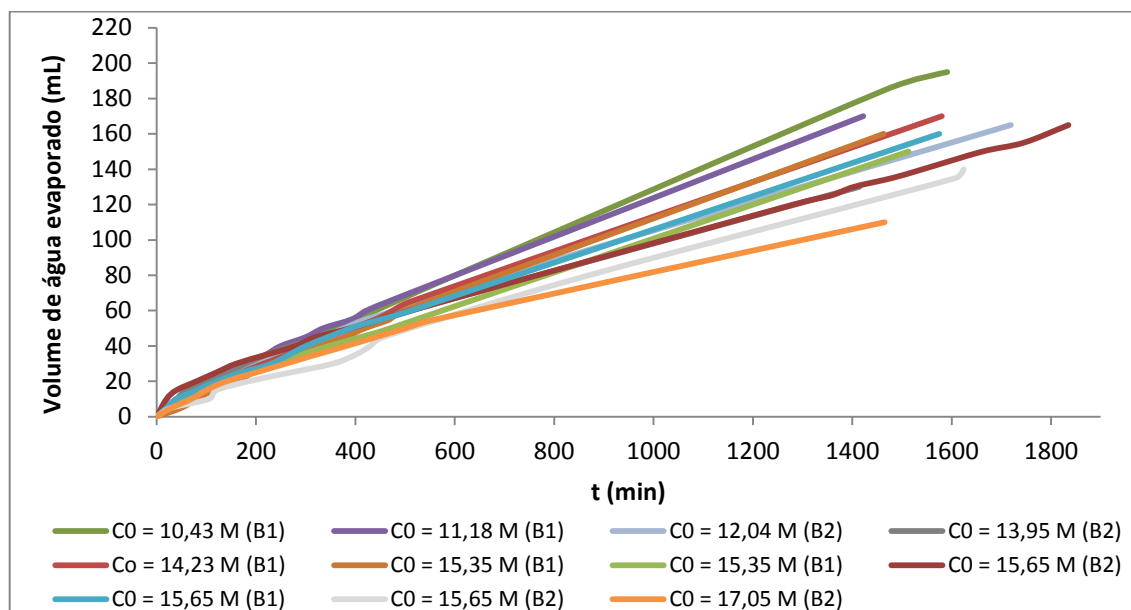


Figura 3.1.1 - Evolução do volume de água evaporada em função do tempo para a experiência realizada à temperatura de 35 °C.

Independentemente da bomba utilizada, verifica-se, que os ensaios têm praticamente todos o mesmo comportamento, diferindo apenas no declive das retas.

Na Figura 3.1.2 é apresentada a evolução da concentração da solução absorvente de cloreto de lítio em função do volume de água evaporada.

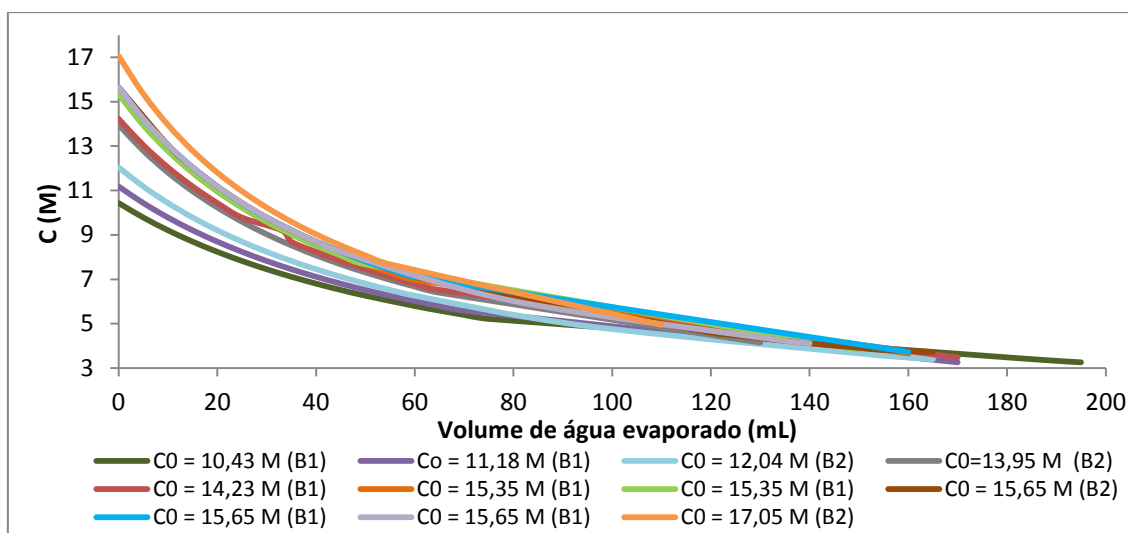


Figura 3.1.2 - Variação da concentração da solução de cloreto de lítio em função do volume de água evaporada a temperatura de ensaio 35 °C.

Conforme se pode observar na Figura 3.1.2, a concentração da solução absorvente vai diminuindo ao longo da experiência, diminuindo a sua capacidade de absorção de vapor de água presente na corrente gasosa, o que reduz a capacidade do sistema para remover calor da fonte quente, conforme se referiu anteriormente.

Como nos ensaios realizados à temperatura de 35 °C foram realizados com recurso a duas bombas distintas, cujos caudais volumétricos nas condições ambiente, são para a bomba 1 (B1)  $402 \pm 6,2$  l/min e para a bomba 2 (B2)  $358 \pm 8,6$  l/min, apresentam-se de seguida os resultados diferenciados de acordo com o tipo de bomba utilizado.

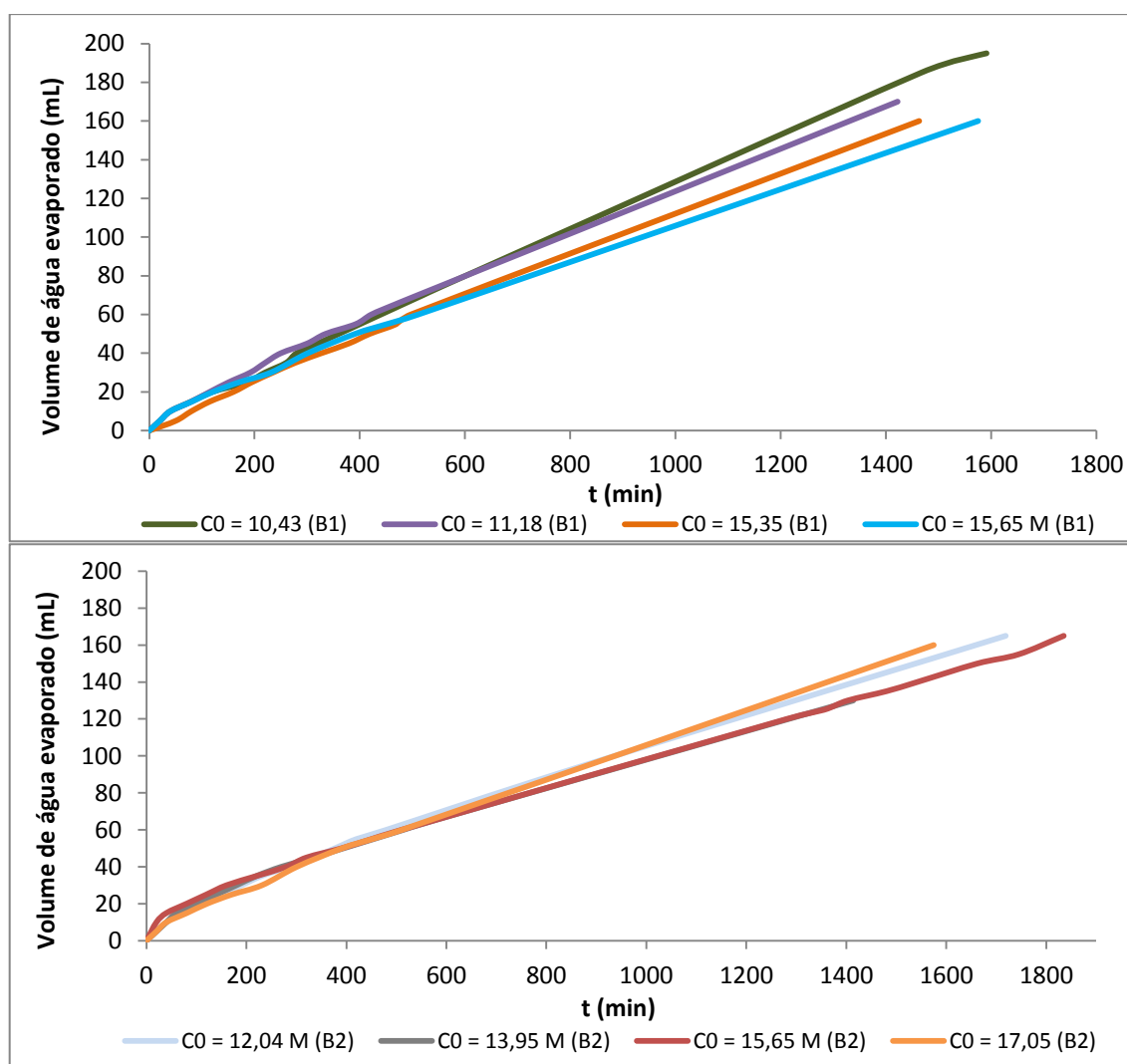


Figura 3.1.3 - Representação gráfica do volume de água evaporada em função do tempo para a temperatura de ensaio de 35 °C, utilizando-se a bomba B1 ( $402 \pm 6,2$  l/min) e a bomba B2 ( $358 \pm 8,6$  l/min).

A Figura 3.1.3 apresenta a evolução do volume de água evaporada em função do tempo da realização da experiência. Verifica-se que a evaporação da água ocorre de forma mais acentuada nos instantes iniciais para os quatro ensaios em análise. Tal situação deve-se certamente ao facto de nos instantes iniciais da experiência a proveta conter uma coluna de fluido refrigerante, a água, mais elevada, o que favorece a transferência de massa do líquido para a corrente gasosa. Por outro lado, é também nos instantes iniciais da experiência que a concentração da solução absorvente é mais elevada, sendo, por isso, mais eficaz na remoção da humidade da corrente gasosa que nela é borbulhada.

Assim, é no período inicial do ensaio que se observa o caudal máximo de água evaporada e, conseqüentemente, a taxa máxima de calor transferido resultante do processo de evaporação, pelo que para a utilização deste sistema conviria criar condições que permitissem manter as condições iniciais em que ocorre cada ensaio.

Como se pode observar no gráfico da Figura 3.1.3, após um período inicial em que a velocidade de evaporação é máxima, o sistema parece evoluir para uma situação de estado estacionário no que se refere à taxa de evaporação de água, uma vez que esta se mantém aproximadamente constante

Com vista a calcular o calor removido do banho termostatzado no período em que o estado do sistema parece ter um comportamento estacionário, determinou-se a velocidade de evaporação média no período correspondente com recurso à regressão linear dos pontos que caracterizam esse período, conforme se apresenta no gráfico da Figura 3.1.4.

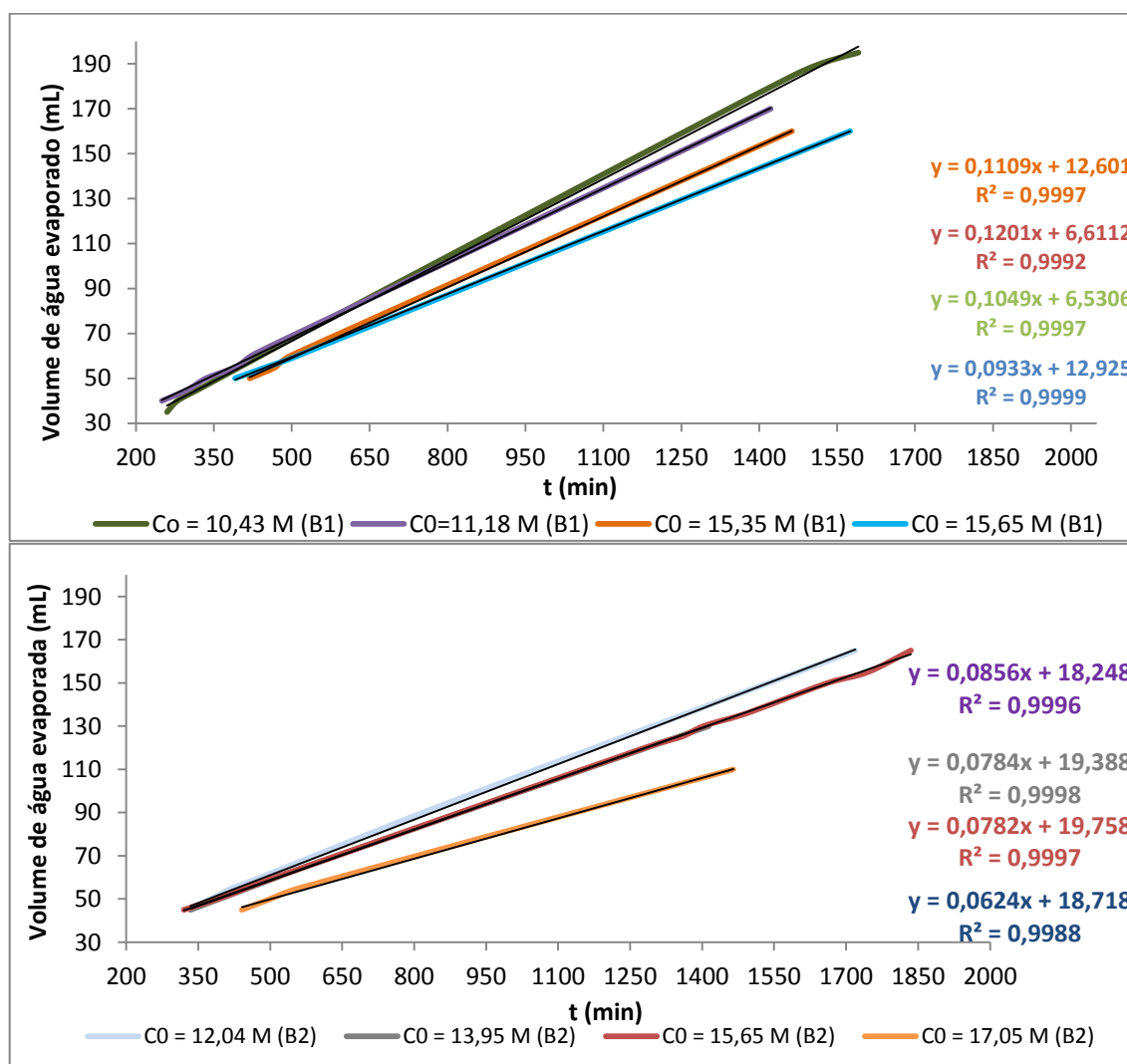


Figura 3.1.4 - Variação do volume de água evaporada em função do tempo no período estacionário, para a experiência realizada à temperatura de 35 °C, utilizando-se a bomba B1 ( $402 \pm 6,2$  L/min) e a bomba B2 ( $358 \pm 8,6$  L/min).

Comparando os gráficos da figura anterior, verifica-se que claramente nas experiências em que se utilizou a bomba B1, com maior caudal, a transferência de massa foi mais efetiva, traduzindo-se num caudal volumétrico de água evaporado maior evidenciando pelo maior declive das retas de regressão. Este fator parece, de resto, influenciar de forma mais decisiva a eficiência do processo de refrigeração do



que a concentração inicial da solução absorvente, conforme se pode constatar em ambos os gráficos.

Na Tabela 3.1.2 encontram-se os valores da taxa de calor máxima removida no banho termostatizado calculada a partir do caudal de evaporação de água instantâneo máximo obtido em cada ensaio ( $\dot{Q}_{\max}$ , expressa em W). A taxa média de calor removido no período em que a taxa de evaporação da água permanece estacionária ( $\bar{Q}_{e.e.}$ , em W) obteve-se a partir do caudal médio de água evaporada nesse período, determinado a partir da regressão linear apresentada na figura anterior. Finalmente, determinou-se a taxa média de calor removido em toda a experiência ( $\bar{Q}$ , em W) obtida a partir do caudal de água evaporada médio de cada ensaio, para cada concentração do ensaio à temperatura de 35 °C

Tabela 3.1.2 - Valores da taxa de calor máximo, média em toda a experiência e média no período estacionário dos ensaios realizados à temperatura de 35 °C.

	Data (cor da linha)							
	B1				B2			
	11/set (verde escuro)	19/nov (roxo)	12/nov (laranja escuro)	2/nov (azul)	27/nov (azul claro)	16/set (cinza)	17/set (Tijolo)	25/nov (laranja claro)
$C_0^{\text{evap}}$ (M)	10,43	11,18	15,35	15,65	12,04	13,95	16,65	17,05
$\dot{Q}_{\max}$ (W)	10,02	10,02	7,16	10,02	10,02	10,02	20,03	6,68
$\bar{Q}_{e.e.}$ (W)	4,81	3,74	4,44	4,20	2,50	3,43	3,14	3,13
$\bar{Q}$ (W)	4,91	4,79	4,38	4,07	3,99	3,68	3,60	6,68

A análise dos resultados anteriores evidenciam que a taxa de calor removida do banho termostatizado é cerca de três vezes superior à taxa de calor no período estacionário, indiciando que idealmente deveriam ser asseguradas estas condições num sistema à escala real de refrigeração por absorção com apoio solar. Conforme já era indiciado pela Figura 3.1.4, verifica-se que, contrariamente ao esperado, na experiência em que se utilizou uma solução absorvente inicialmente mais concentrada, não se verificou uma taxa de remoção de calor superior.

Com vista a comparar o resultado obtido nos ensaios em que se utilizaram concentrações distintas de solução absorvente, representou-se o caudal instantâneo da água evaporada (calculado como o quociente entre o volume de água evaporada entre duas medições consecutivas e a duração desse intervalo) em função da concentração da solução de cloreto de lítio, como apresentado no gráfico da Figura 3.1.5.

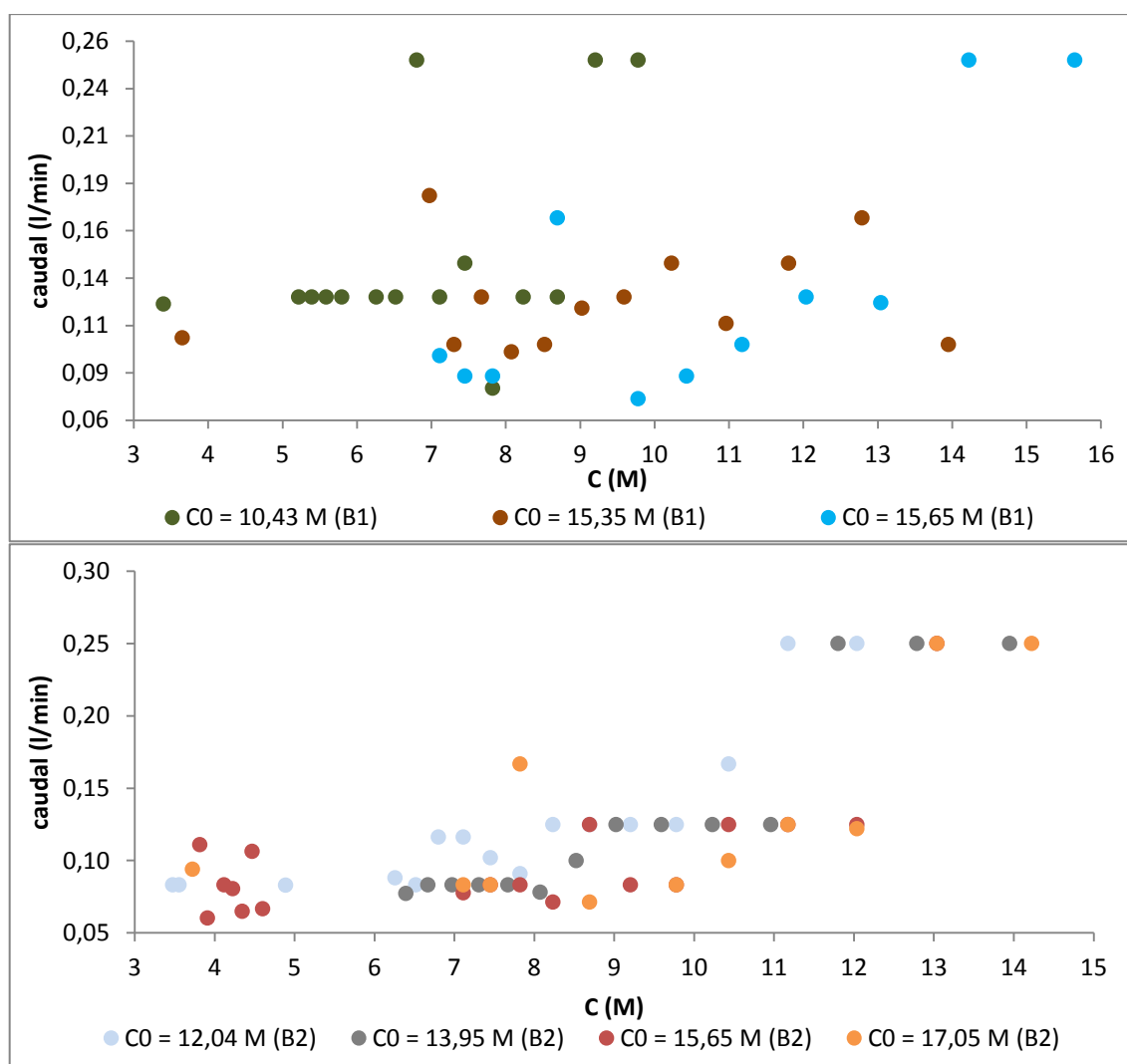


Figura 3.1.5 - Representação gráfica do caudal vs concentração para à temperatura ambiente de 35 °C, utilizando-se a bomba B1 ( $402 \pm 6,2$  L/min) e a bomba B2 ( $358 \pm 8,6$  L/min).

Conforme se referiu anteriormente, ao longo da experiência, a solução absorvente ia-se tornando sucessivamente mais diluída. Assim, seria expectável que em ensaios realizados com soluções absorventes inicialmente mais concentradas, após algum tempo de experiência, quando se atingisse a concentração na solução absorvente dos ensaios realizados com soluções menos concentradas, o comportamento em ambas as experiências fosse semelhante. Seria pois de esperar que ao representar o caudal instantâneo de evaporação do fluido de refrigeração em função da concentração da solução absorvente as linhas dos diferentes ensaios fossem semelhantes. Contudo a análise da figura anterior revela que, particularmente para o período inicial da experiência esse comportamento não ocorre. Este facto poderá dever-se a que no arranque da experiência a temperatura da solução absorvente aumenta rapidamente para um valor de equilíbrio com a temperatura ambiente, pelo que durante este período inicial o ajuste de temperaturas do sistema pode influenciar e alterar a velocidade de evaporação da água, explicando este desajuste no comportamento observado. Por outro lado, como

o cálculo do caudal instantâneo de água evaporada resulta de um quociente entre duas leituras sucessivas de altura de líquido, pequenos erros efetuados nessa leitura transforma-se em desvios significativos no cálculo daquela grandeza, o que explica alguns pontos experimentais claramente fora da linha expectável. A respeito destes erros, pode contudo, verificar-se, particularmente para as experiências realizadas com a bomba 2, que o caudal instantâneo é inicialmente elevado, reduzindo em seguida, ocorrendo similitude de comportamento nos diversos ensaios

Para além dos ensaios a cima mencionados e discutidos, realizaram-se mais quatro conjuntos de ensaios à temperatura de 30 °C, 40 °C, 45 °C e 50 °C, cujos resultados foram tratados de forma análoga. Os resultados referentes a estes conjuntos de temperatura encontram-se agrupados em cinco figuras (da Figura 3.1.6 à

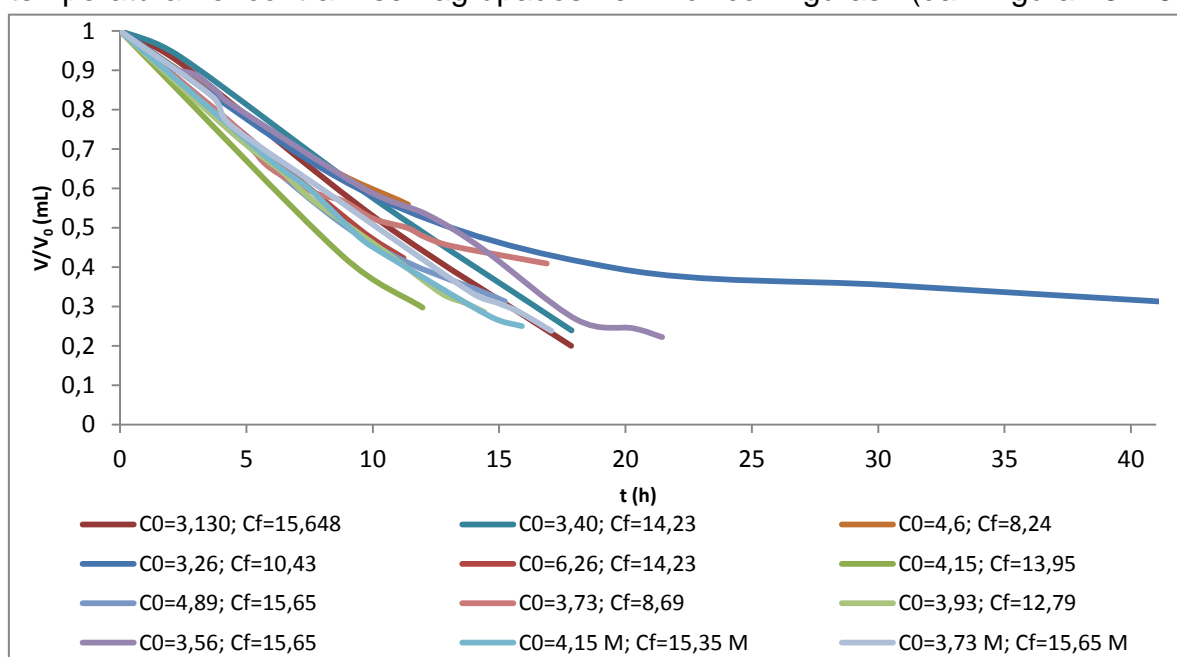


Figura 3.2.1).

Na Figura 3.1.6 encontra-se esquematizado a evolução do volume de água evaporada em função do tempo de realização da experiência para as temperaturas do banho termostatzado de 30 °C, 40 °C, 45 °C e 50 °C.

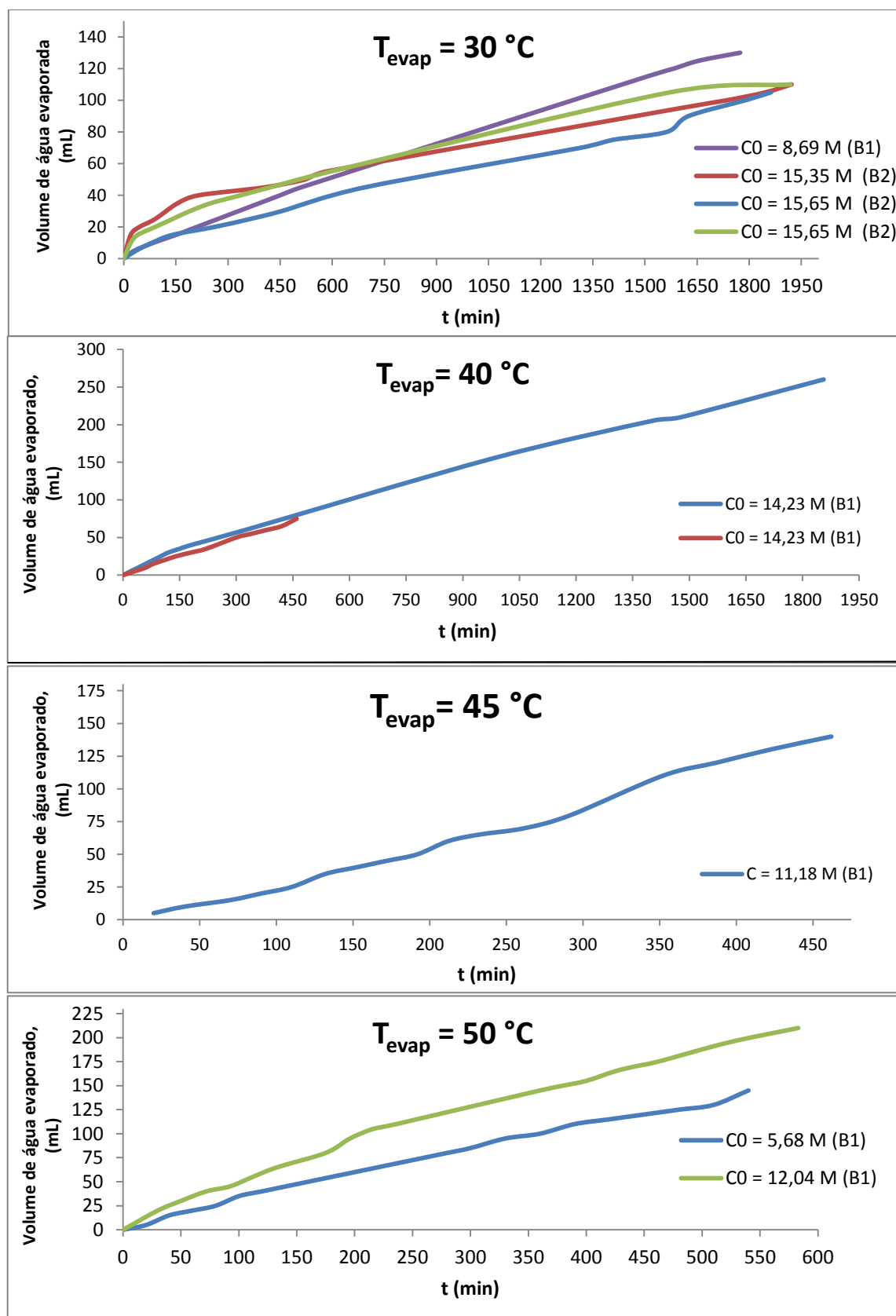


Figura 3.1.6 – Variação do volume de água evaporada em função do tempo.

No gráfico da temperatura de  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  no ensaio em que se utilizou uma solução de cloreto de lítio com maior concentração molar for realizados com o auxílio da bomba de ar B2, (caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6\text{ L/min}$ ), enquanto que o ensaio realizado

com a solução de cloreto de lítio com uma concentração inicial de 8,69 M foi realizado com o auxílio da bomba de ar B1, com um caudal volumétrico de  $400 \pm 5,4$  L/min. Também os ensaios realizados a outras temperaturas foram realizados com bombas distintas, identificando-se qual a utilizada na legenda da figura.

Na Figura 3.1.6, tal como acontecia no ensaio a 35 °C, verifica-se que a evaporação de água ocorre de forma mais acentuada nos instantes iniciais, particularmente para os ensaios das concentrações de 15,35 M e de 15,65 M (linha verde); 11,18 M, e 12,04 M nos ensaios de 30 °C; 45 °C e 50 °C, respetivamente. Este facto pode ser explicado em virtude de ser nos instantes iniciais da experiência que a proveta, que contém o fluido refrigerante apresentar o nível mais elevado de líquido, o que favorece a transferência de massa do líquido para a corrente gasosa. Por outro lado, é também nos instantes iniciais da experiência que a solução absorvente é mais concentrada, sendo, por isso, mais eficaz na remoção da humidade da corrente gasosa que nela é borbulhada. Assim, é no período inicial do ensaio que se observa o caudal máximo de água evaporada e, conseqüentemente, a taxa máxima de calor transferido decorrente do processo de evaporação

Observa-se, ainda, que nos ensaios à temperatura de 30 °C de concentração inicial de 8,69 M, nos ensaios à temperatura de 40 °C, no ensaio a 45 °C de concentração inicial de 14,23 M, em que se utilizou a bomba B1 que continha maior caudal volumétrico, os ensaios mencionados apresentam um comportamento distinto, uma vez que, apesar de partirem de concentrações diferentes apresentam de um modo geral um caudal de evaporação de água ao longo da experiência superior, conforme é visível pelo maior declive da reta tangente à curva representada, o que pode ser explicado pelo facto de o maior caudal de corrente de ar favorecer a transferência de massa no processo de evaporação.

Verifica-se, ainda, que em algumas experiências, como é o caso dos ensaios realizados a 45 °C (linha castanha) e 30 °C (linhas verde e roxa), que a partir de um certo momento do ensaio após o período estacionário, o declive diminui, o que indicia um período com um caudal de evaporação do fluido refrigerante menor. Tal situação dever-se-á certamente ao facto de a altura da coluna de água na proveta onde ocorre a evaporação ser mais baixa e, por outro lado, a solução absorvente se encontrar bastante diluída

Como se pode observar no gráfico anterior, de um modo geral, após um período inicial em que a velocidade de evaporação é máxima, o sistema parece evoluir para uma situação de estado estacionário, em que a velocidade de evaporação de água é aproximadamente constante. Posteriormente, ocorre um período em que a velocidade de evaporação decresce, possivelmente em resultado de a altura da coluna de água na proveta onde ocorre a evaporação ser já muito reduzida e, por outro lado, a solução absorvente se encontrar bastante diluída.

Com vista a calcular o calor removido do banho termostatzado no período em que o estado do sistema parece estar estacionário, determinou-se a correspondente velocidade de evaporação com recurso à regressão linear dos pontos que caracterizam esse período, conforme se apresenta no gráfico seguinte.

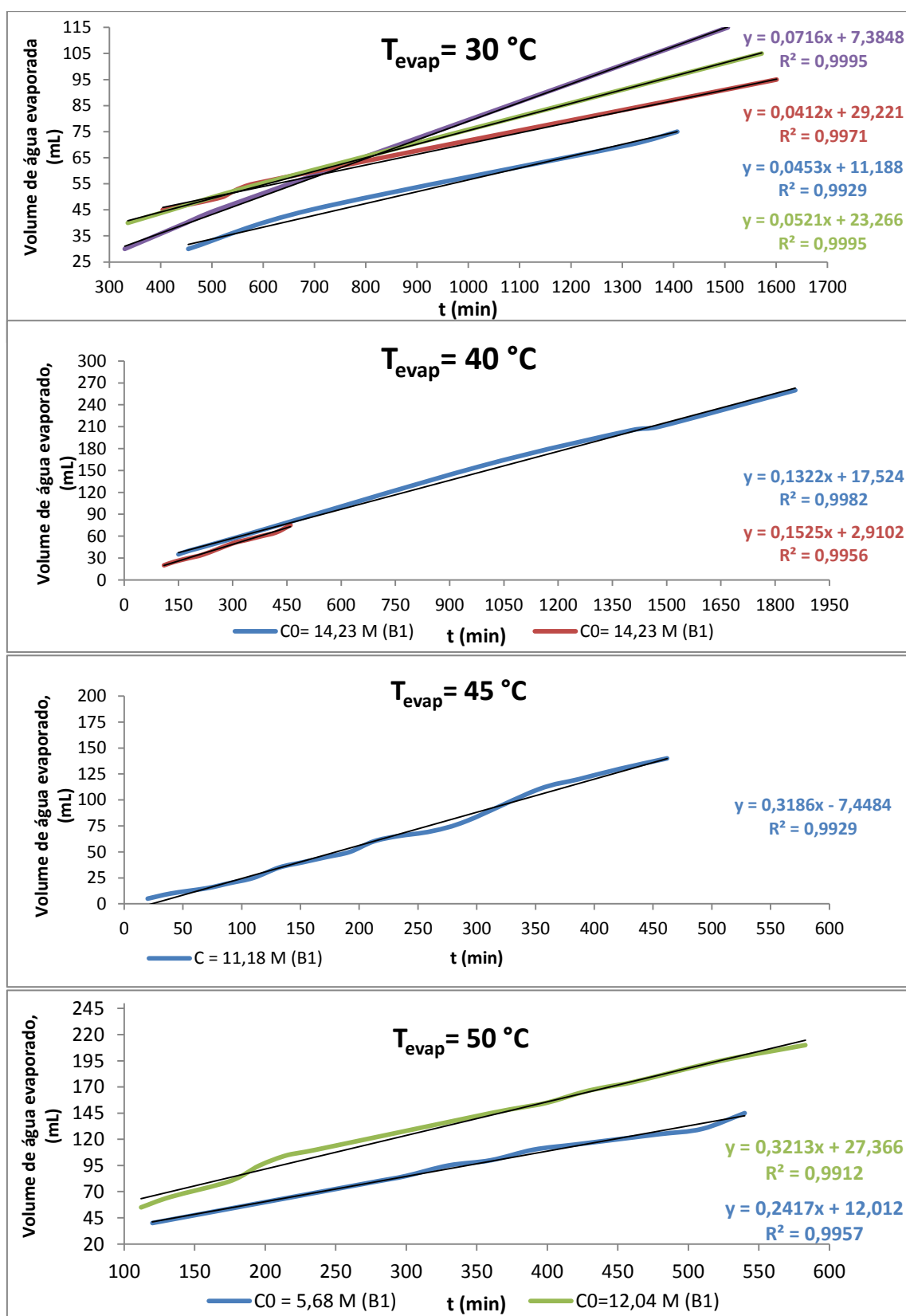


Figura 3.1.7 - Variação do volume de água evaporada em função do tempo no período estacionário.

Assim, representado apenas o período estacionário dos ensaios realizados à temperatura de evaporação, pode-se concluir que neste período o caudal de evaporação do fluido refrigerante se manteve aproximadamente constante, sendo possível, a partir das retas de regressão, calcular o caudal médio nesse período estacionário dos ensaios.

Na Tabela 3.1.3 encontram-se os valores das taxas de calor máximos ( $\dot{Q}_{\max}$ , em W), médio no período estacionário ( $\bar{Q}_{e.e.}$ , em W) e calor médio em todo o período da experiência ( $\bar{Q}$ , em W) para os ensaios à temperatura de 30 °C, 40 °C, 45 °C e 50 °C.

Como se pode verificar pela análise da tabela, a taxa de calor máximo é muito superior à taxa de calor média e a taxa de calor em estado estacionário, podendo-se comprovar assim que seria de todo vantajoso a manutenção do processo de refrigeração nas condições observadas no período em que se obteve o valor máximo de calor transferido, evitando a entrada no período em estado estacionário. Verifica-se também, que a taxa de calor, na sua maioria, aumenta com o aumento da temperatura, não se podendo afirmar o mesmo para a concentração.

Tabela 3.1.3 – Valores do calor transferido máximo, médio global e médio no período estacionário para os ensaios efetuados.

T (°C)	30				40		45		50			
Data (cor linha )	10/nov (roxa)	10/out (castanha)	2/out (verde)	29/abr (verde)	29/set (azul)	15/set (roxa)	26/mai (azul)	16/jun (castanha)	29/abr (azul)	19/mai (roxa)	3/jun (verde)	30/abr (castan ha)
$C_0^{evap}$ (M)	8,69	15,35	15,65	15,65	14,23	14,23	11,18	14,23	5,68	8,24	12,04	12,79
$\dot{Q}_{\max}$ (W)	6,69	30,11	5,76	20,07	10,00	10,09	19,86	85,10	19,62	18,19	28,37	78,47
$\bar{Q}_{e.e.}$ (W)	2,87	1,65	1,82	2,09	5,29	6,10	12,65	7,16	9,60	3,25	12,76	3,68
$\bar{Q}$ (W)	2,94	2,30	2,27	2,3	5,6	6,58	12,03	16,43	10,54	4,44	14,31	5,35

Conforme era já visível pelo comportamento do gráfico representado na Figura 3.1.6, o declive das curvas no período inicial dos ensaios é muito superior ao do resto da experiência, o que se traduz num valor muito mais elevado de calor transferido nesse período inicial, conforme se observa na tabela anterior, comprovando que são estas condições iniciais que levam aos melhores resultados do processo de refrigeração.

No gráfico da Figura 3.1.8 é representada a concentração da solução de cloreto de lítio em função do volume de água evaporada, que permite visualizar a forma como evolui a concentração da solução absorvente ao longo da experiência.



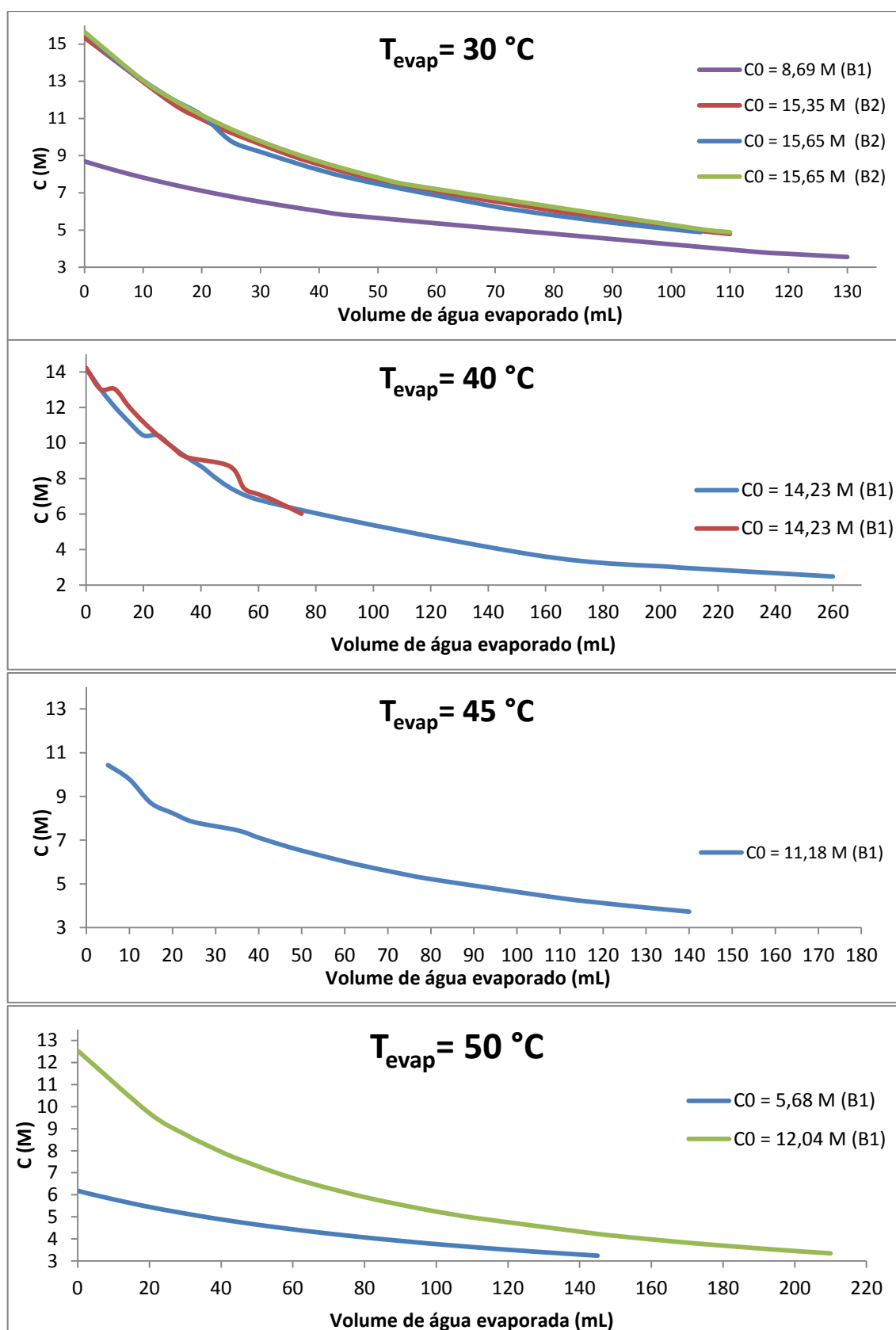


Figura 3.1.8 - Evolução da concentração da solução de cloreto de lítio em função do volume de água evaporada.

A concentração da solução absorvente vai diminuindo ao longo da experiência, diminuindo a sua capacidade de absorção de vapor de água, o que reduz a capacidade do sistema para remover calor da fonte quente, conforme se referiu anteriormente.

Com vista a comparar o resultado obtido nos ensaios em que se utilizou concentrações distintas da solução absorvente, representou-se o caudal instantâneo da água evaporada (calculado como o quociente entre o volume de água evaporada entre duas medições consecutivas e a duração desse intervalo) em função da concentração da solução de cloreto de lítio.

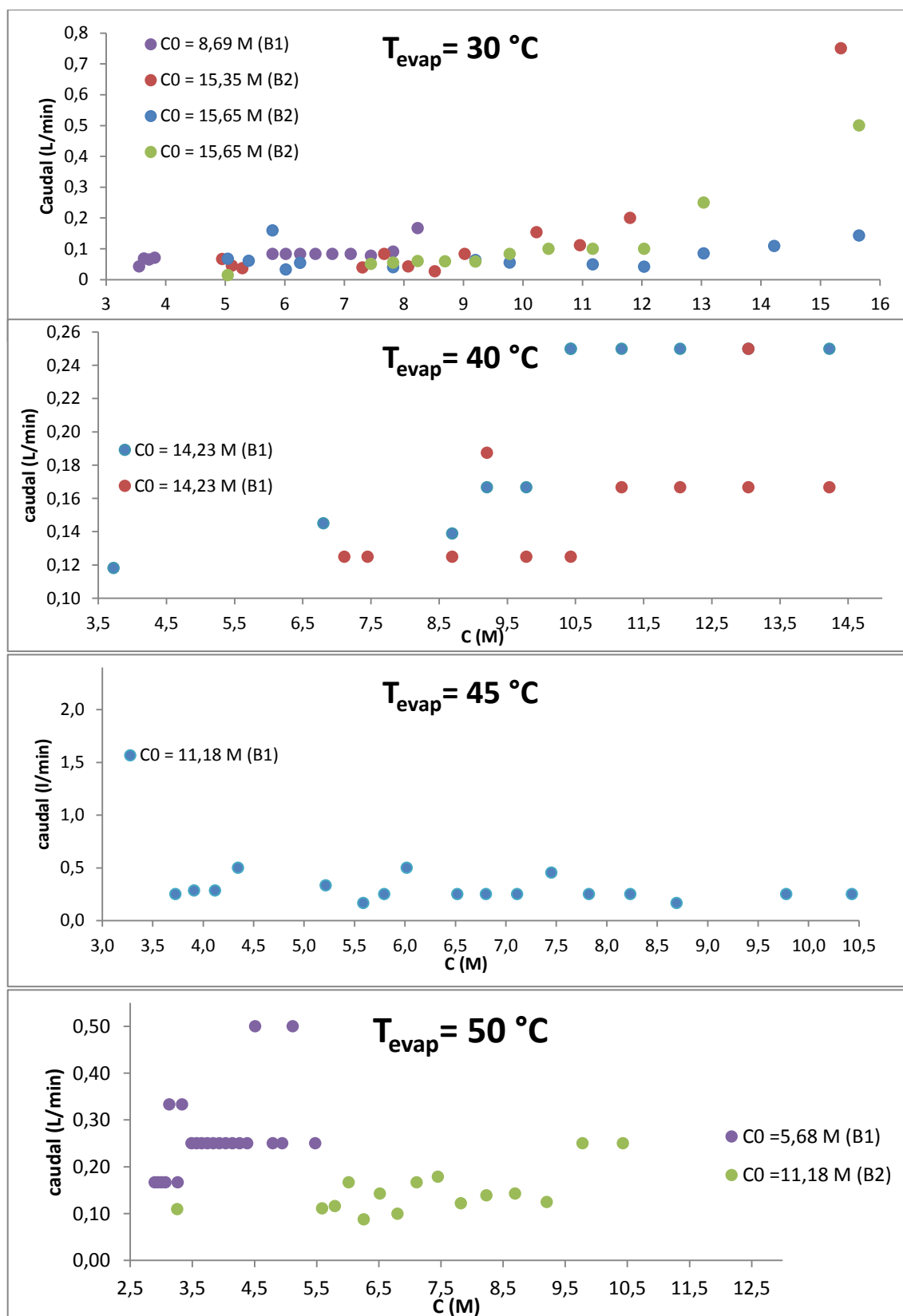


Figura 3.1.9 - Variação do caudal instantâneo de evaporação de água em função da concentração da solução de cloreto de lítio para a temperatura de 30 °C no banho termostaticado.

Na Figura 3.1.9 para o ensaio a 30 °C pode observar-se que a experiência em que a concentração inicial da solução absorvente foi de 15,65 M, representada pela cor azul, apresenta um comportamento distinto das experiências realizadas com uma solução absorvente de concentração semelhante (símbolos verdes e castanhos), decorrente de no início da experiência a velocidade de evaporação ser distinta. No conjunto de experiências realizado com a mesma bomba (B2), verifica-se um comportamento inicial distinto em cada ensaio, o que poderá ser explicado pela diferença de temperatura das soluções iniciais. Efetivamente, verificava-se que após o arranque da experiência, ocorria uma elevação da temperatura da solução absorvente em resultado de o processo de absorção ser exotérmico, que era dependente do tempo de preparação e da temperatura ambiente. Tal facto poderá ter influenciado o comportamento da corrente gasosa que vai promover a transferência de massa na proveta contendo o fluido refrigerante. A variabilidade observada neste gráfico no período estacionário, pode ser explicada por pequenos erros de leitura da altura de água na proveta, que se repercutem no cálculo do caudal de evaporação de água “instantâneo” de forma significativa, uma vez que a sua quantificação envolve a determinação do quociente de diferenças sucessivas de alturas de líquido na proveta e de tempo de ensaio.

A análise do ensaio com concentração inicial de solução absorvente de 8,69 M, a 30°C, representada pela cor roxa, permite verificar que para os mesmos valores de concentração na solução absorvente os caudais de água evaporada são superiores em relação aos demais ensaios, o que decorre do caudal da corrente gasosa ser mais elevado, uma vez que esta experiência foi realizada com a bomba, B1.

Na figura anterior, no gráfico correspondente aos ensaios da temperatura de 45 °C, estes apresenta praticamente o mesmo comportamento a exceção do período inicial, em que o ensaio de menor concentração tem um comportamento constante, devendo apresentar no período inicial um caudal mais elevado, seguindo-se um decréscimo acentuado, como apresentado nos ensaios até agora discutidos, este facto mais uma vez poderá dever-se a uma má leitura da altura de fluido na proveta. Após o período inicial o comportamento dos ensaios é semelhante, apresentando o ensaio de maior concentração, maior caudal volumétrico, ou seja, maior capacidade de absorção da humidade da corrente gasosa.

No gráfico dos ensaios da temperatura de 50 °C, pode-se verificar claramente que o ensaio onde se utilizaram a bomba B1, de caudal  $402 \pm 6,2$  L/min e a bomba B2 de caudal  $358 \pm 8,6$  L/min. Verifica-se que no ensaio em que se utilizou a bomba com maior caudal volumétrico (B2) os ensaios apresentam maiores caudais de água evaporado e os ensaios onde se utilizou a bomba de menor caudal volumétrico apresentam valores de caudais de água evaporada.

Ao comparar dois ensaios de concentração semelhante onde se utiliza duas bombas diferentes, pode-se verificar que o caudal volumétrico do ar tem um grande contributo na transferência de massa no processo.

### 3.2. Resultados do processo de regeneração

Conforme se referiu no capítulo anterior, durante o processo de evaporação a concentração da solução absorvente vai diminuindo em resultado da absorção da água transportada pela corrente gasosa. Assim a eficácia do processo de remoção da água vai diminuindo, pelo que se mostra necessário realizar a operação inversa e remover a água da solução absorvente por forma a regenerá-la e torná-la apta a ser de novo utilizada no processo de refrigeração por evaporação.

No presente trabalho, tal como se descreveu no capítulo 2, a regeneração da solução de cloreto de lítio foi efetuada colocando a proveta com esta solução num banho aquecido a cerca de 96°C, com recurso a uma placa de aquecimento.

A Tabela 3.2.1 apresenta os parâmetros medidos nos ensaios de regeneração: volume de água evaporada em todo o processo de regeneração ( $V_{H2O, evap}^{reg}$ ) e o tempo que decorreu a experiência (t), bem como as concentrações inicial ( $C_0^{reg}$ ) e final ( $C_f^{reg}$ ) da solução de cloreto de lítio, o caudal volumétrico médio de evaporação da água da solução ( $\dot{V}$ ) e a taxa de calor necessária para regenerar a solução ( $\dot{Q}_{Reg}$ ).

Tabela 3.2.1 - Resultados obtidos no processo de regeneração à temperatura de 96 °C.

Data do ensaio	$V_{H_2O, evap}^{reg}$ (mL)	t (min)	$\dot{V} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Reg}$ (W)	$C_0^{reg}$ (M)	$C_f^{reg}$ (M)
29/abr	145	1308	1,85	4,22	2,74	5,68
30/abr	65	389	2,78	7,19	6,14	12,79
03/jun	210	1118	3,13	7,40	2,85	12,04
19/mai	75	684	1,83	4,19	4,60	8,24
26/mai	165	930	2,96	6,52	3,64	15,65
16/jun	175	1072	2,72	5,95	3,40	14,23
15/set	75	673	1,86	4,79	6,02	14,23
29/set	275	1117	4,10	10,47	2,37	14,23
11/set	165	2472	1,11	2,66	3,26	10,43
16/set	130	718	3,02	7,83	4,15	13,95
17/set	160	850	3,14	7,00	3,73	15,65
12/nov	150	865	2,89	7,23	3,65	12,79
12/nov	170	1219	2,32	5,09	3,48	15,65
17/nov	150	954	2,62	5,74	3,84	15,35
19/nov	170	1536	1,84	4,03	3,26	11,18
02/nov	160	1024	2,60	5,70	3,73	15,65
25/nov	130	665	3,26	7,11	4,38	17,05
27/nov	50	1536	0,54	1,18	3,26	11,18
27/nov	140	688	3,39	7,40	4,12	15,65
10/out	110	686	2,67	6,36	4,80	15,35
20/out	110	914	2,01	4,87	4,89	15,65
10/nov	130	1013	2,14	4,67	3,56	8,69
02/jun	100	1145	1,46	3,28	4,89	13,04

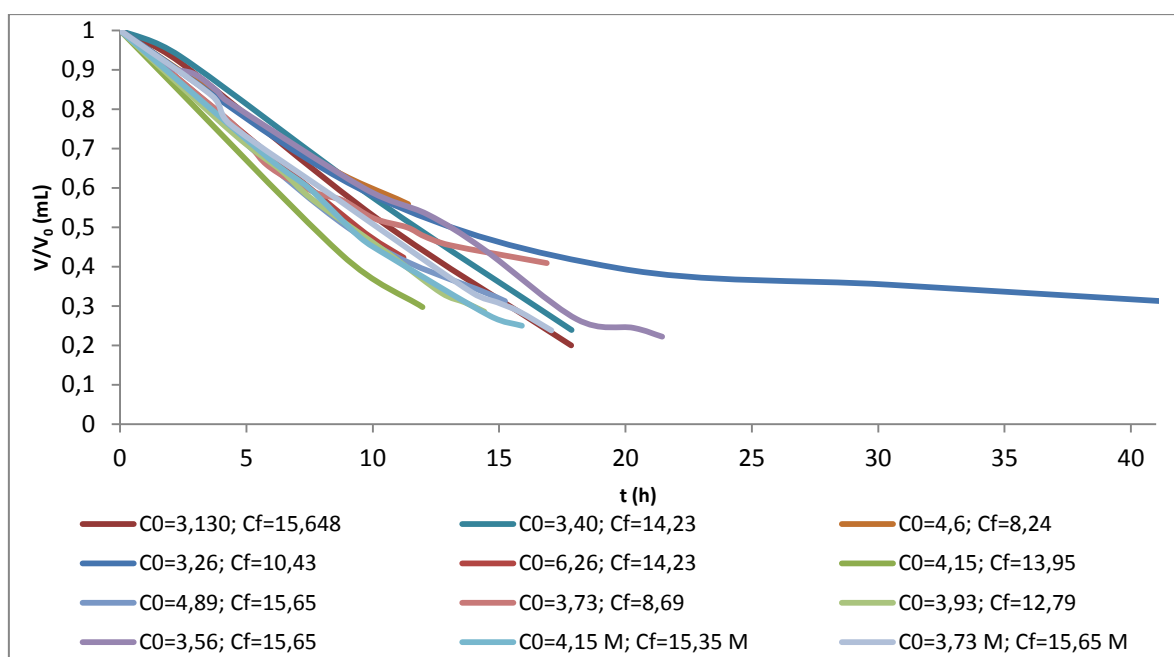


Figura 3.2.1 - Evolução da razão entre o volume num dado instante e o volume da solução absorvente em função do tempo no processo de regeneração da solução absorvente

A Figura 3.2.1 representa a evolução da razão entre o volume num dado instante e volume de solução absorvente inicialmente existente na proveta em função do tempo de regeneração. Pode verificar-se que de uma forma geral o caudal de evaporação de água no início da experiência é menor, passando depois por um período em que o declive da reta é maior, isto é, a velocidade de evaporação de água é superior, sendo que no período final do processo de regeneração, a quantidade de água evaporada por unidade de tempo fica muito reduzida. Esta situação pode ser explicada pelo facto de no início do processo de regeneração uma parte da energia fornecida pelo banho ser usada como calor sensível para elevar a temperatura da solução absorvente. Quando a solução absorvente atingia a temperatura do banho (cerca de 96 °C) todo o calor fornecido passava a ser usado como calor latente, iniciando-se um período em que a taxa de evaporação de água se mantinha praticamente constante, uma vez que todo o calor fornecido era usado para vaporizar a água da solução absorvente diluída. Num terceiro período, observa-se que a velocidade de evaporação diminuía, verificando-se que para soluções muito concentradas o processo de vaporização da água se torna muito lento. Esta situação pode ser explicada pelo facto de o calor latente de vaporização da água em soluções de cloreto de lítio aumentar, tornando o processo mais lento. De facto a energia absorvida pela solução no processo de regeneração é superior à energia libertada no processo de absorção, correspondendo esta diferença à entalpia de diluição. Conde (2004) verificou que a entalpia de diluição da solução de cloreto de lítio aumenta significativamente com a concentração (por exemplo para uma temperatura de 90 °C e uma fração mássica de LiCl de 50%, o calor latente de vaporização da água na solução é 400 kJ/kg, superior ao calor latente de

vaporização da água pura à mesma temperatura, apresentando um incremento de cerca de 20%), o que explica que a energia requerida para volatilizar a água no processo de regeneração vá sendo sucessivamente superior, tornando o processo mais lento, conforme se verificou experimentalmente.

A Figura 3.2.2 representa o caudal volumétrico de água evaporada em função da concentração da solução, o que permite corroborar e mais facilmente visualizar aquilo que foi acima referido.

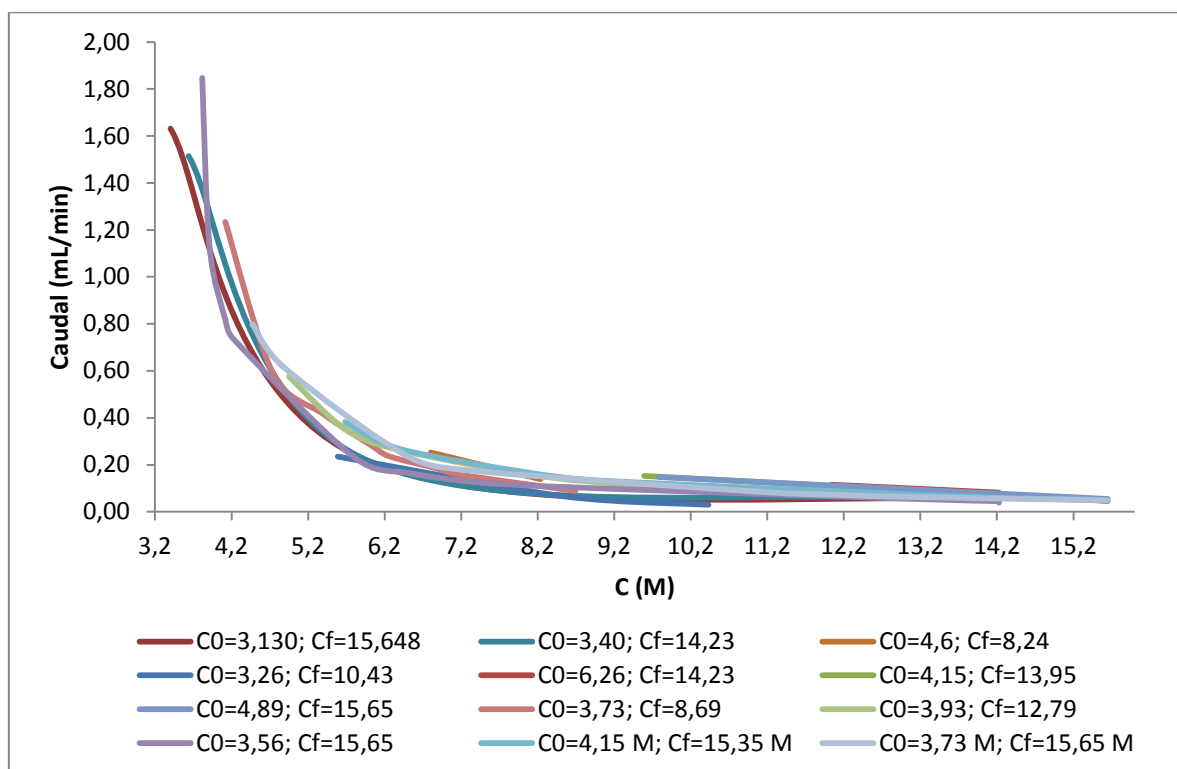


Figura 3.2.2 – Evolução do caudal médio de água evaporada em função da concentração da solução absorvente no processo de regeneração

Como mencionado anteriormente o caudal de vaporização da água no processo de regeneração da solução de cloreto de lítio diminui significativamente à medida que a concentração da solução absorvente aumenta, verificando-se um comportamento análogo em todos os ensaios representados na figura anterior, em que para concentrações superiores a cerca de 6 mol/L, o caudal de evaporação se torna inferior a 0,2 mL/min tendendo lentamente para um valor próximo de zero.

Na Tabela 3.2.2 encontram-se os valores das taxas de calor do processo de evaporação e do processo de regeneração, e o correspondente coeficiente de desempenho (COP), que, conforme se referiu anteriormente é a razão entre a taxa de calor removida no processo de evaporação e a soma da taxa de calor necessária para a regeneração da solução de cloreto de lítio com a potência útil da bomba.



Tabela 3.2.2 - Dados das taxas de calor do processo de evaporação e de regeneração para os ensaios efetuados, e consequente coeficiente de desempenho.

Ensaio	T (°C)	$C_0^{evap}$ (M)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	$\dot{Q}_{Reg} + P_B$ (W)	COP	$\overline{COP}$ (média $\pm$ desvio padrão)
29/abr	50	5,68	10,54	43,22	0,244	0,276 $\pm$ 0,054
03/jun	50	12,04	14,31	46,40	0,308	
26/mai	45	11,18	12,03	45,52	0,266	0,316 $\pm$ 0,071
16/jun	45	14,23	16,43	44,95	0,366	
15/set	40	14,23	6,58	43,79	0,150	0,132 $\pm$ 0,026
29/set	40	14,23	5,60	49,47	0,113	
11/set	35	10,43	4,91	41,66	0,118	0,102 $\pm$ 0,028
16/set	35	13,95	3,60	46,83	0,078	
17/set	35	15,65	3,6	46,00	0,079	
12/nov	35	15,35	4,38	46,23	0,095	
12/nov	35	14,23	4,31	44,09	0,098	
17/nov	35	15,35	3,97	44,73	0,089	
19/nov	35	11,18	4,79	43,03	0,111	
02/nov	35	15,65	4,07	44,71	0,091	
25/nov	35	17,05	8,62	46,11	0,187	
27/nov	35	12,04	3,99	40,18	0,099	
27/nov	35	15,65	3,45	46,40	0,074	
02/jun	30	15,65	2,27	42,28	0,054	0,056 $\pm$ 0,021
10/out	30	15,35	2,30	45,36	0,051	
20/out	30	15,65	2,30	43,87	0,052	
10/nov	30	8,69	2,94	43,67	0,067	

Dos valores apresentados na tabela anterior pode-se verificar que o coeficiente de desempenho diminui com a redução da temperatura do banho termostatzado, uma vez que quer o calor de regeneração (o processo foi sempre realizado à temperatura aproximada de 96 °C e pressão atmosférica), quer a potência útil da bomba se mantêm aproximadamente constantes. Assim, a redução da temperatura do banho termostatzado leva a que a transferência de calor para a proveta, em que ocorre a vaporização, diminua e consequentemente o caudal de vaporização de água, o que se traduz numa diminuição da taxa de calor de evaporação, que é o termo do numerador da equação de cálculo do COP.

Verifica-se também que, dentro da mesma gama de temperaturas o coeficiente de desempenho aumenta normalmente com o aumento da concentração, particularmente para as temperaturas mais elevadas, conforme se pode observar na figura seguinte.

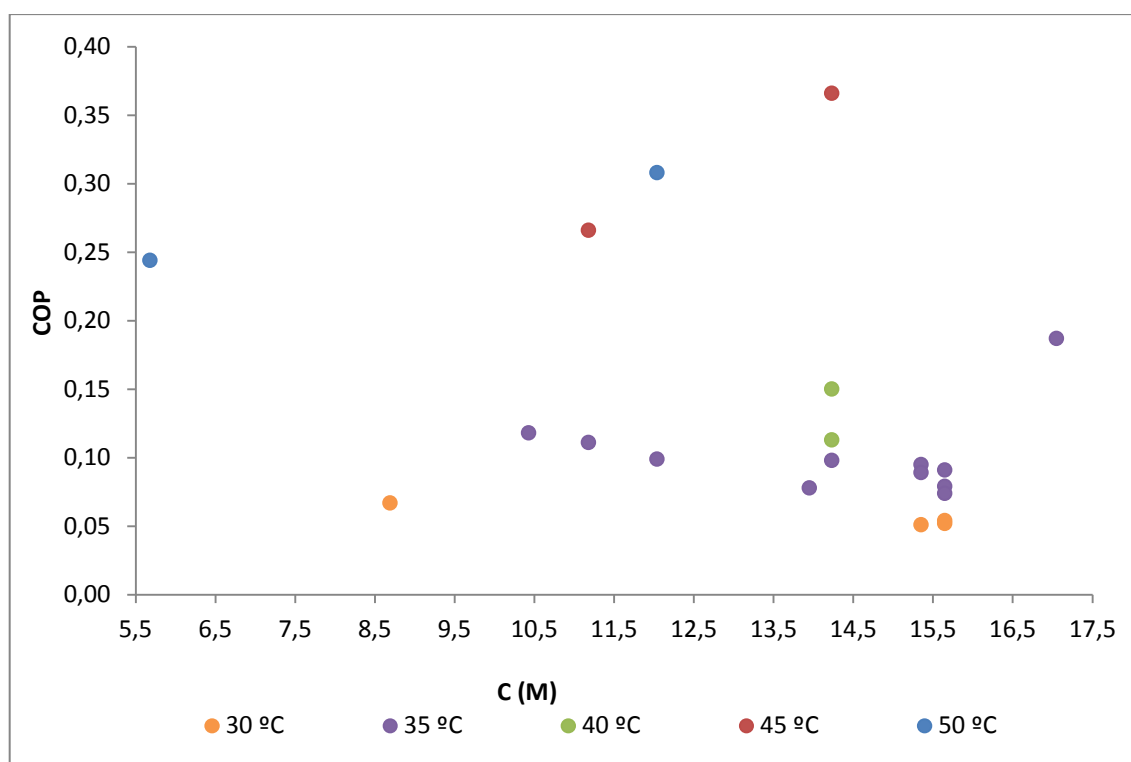


Figura 3.2.3 - Variação do valor do coeficiente de desempenho (COP) com a concentração da solução absorvente

Conforme já referido anteriormente, na generalidade, o COP aumenta com o aumento da temperatura e com o aumento da concentração.

O coeficiente de desempenho de unidades de refrigeração comerciais por absorção, encontram-se numa gama de valores compreendidos entre 0,6 e 0,8, quando os equipamentos operam sob vácuo. No presente trabalho os valores obtidos para este indicador do desempenho do equipamento são inferiores (valores entre 0,06 e 0,32), uma vez que apenas se operou com sistema à pressão atmosférica. Efetivamente, quando os equipamentos operam sob vácuo, a temperatura necessária para a vaporização do refrigerante (água), pode ser mais baixa, aumentando a eficiência do processo de evaporação.

Pode-se, pois, concluir que a unidade de refrigeração estudada apesar de ser muito rudimentar permitiu nalguns ensaios obter valores de COP não muito inferiores aos apresentados em unidades comerciais, apesar de ter operado sempre à pressão ambiente.

Outra razão que poderá tornar interessante o equipamento em estudo reside no facto da sua aplicação prioritária ser em países de elevada exposição solar e temperatura, com deficiências de abastecimento da rede elétrica, nomeadamente os países de África e da América do Sul. Assim, quer o processo de regeneração, quer o processo de bombagem da corrente gasosa poderiam ser suportados com energia renovável solar por via de painéis de aquecimento de água e fotovoltaicos, respetivamente. Assim, embora termodinamicamente a eficiência do processo não

se altere, do ponto de vista económico os custos de funcionamento tenderiam a anular-se, tornando o investimento interessante.



#### **4. *Scale up***

Neste capítulo será apresentado o dimensionamento de uma unidade de refrigeração com as características da unidade piloto em estudo, com a capacidade para arrefecer uma divisão com três pessoas no seu interior.



De modo a complementar o estudo experimental apresentado com a unidade de refrigeração implementada, decidiu-se apresentar um exercício que permite averiguar acerca do eventual interesse prático desta aplicação através do dimensionamento de uma unidade para refrigerar uma divisão interna de uma habitação com uma ocupação de três pessoas. A divisão considerada apresenta uma configuração simples, composta por quatro paredes exatamente iguais, chão e teto. Admitiu-se que 25% da superfície total de uma das paredes é ocupada por janelas e que o chão se encontra totalmente isolado sem perdas nem ganhos energéticos.

A temperatura pretendida dentro da divisão é de 23 °C, sendo a temperatura exterior de 38 °C.

Na Tabela 4.1 encontram-se as dimensões que caracterizam a divisão e, que são necessárias para os cálculos da resistências térmicas e das taxas de calor envolvidas no problema em causa.

Tabela 4.1 – Características principais da divisão a refrigerar.

<b>Comprimento (m)</b>	5
<b>Altura (m)</b>	3
<b>Área do teto (m<sup>2</sup>)</b>	25
<b>Área de cada parede (m<sup>2</sup>)</b>	15
<b>e<sub>parede</sub> (m)</b>	0,8

Na Tabela 4.2 encontram-se os valores típicos dos coeficientes de transferência de calor para o interior e exterior da divisão durante o verão, assim como o valor do coeficiente global de transferência de calor para as janelas, usados na resolução do problema.

Tabela 4.2 - Valores dos coeficientes de transferência de calor interno e externo e do coeficiente global de transferência de calor para as janelas (Stoecker e Jones, 1958).

<b>h<sub>in</sub> (W/m<sup>2</sup>C)</b>	10,0
<b>h<sub>out</sub> (W/m<sup>2</sup>C)</b>	25,0
<b>U<sub>vidro duplo</sub> (W/m<sup>2</sup>C)</b>	3,2

Relativamente às paredes da divisão em questão considerou-se que eram constituídas por duas camadas de tijolo separadas por uma camada de ar estagnado, possuindo um revestimento no interior e no exterior feito com placas de poliestireno expandido (vulgarmente conhecido por esferovite).

Cimento	Tijolo	Placa isolante	Ar estagnado	Placa isolante	Tijolo	Cimento
---------	--------	----------------	--------------	----------------	--------	---------

Figura 4.1 - Representação esquemática do interior da parede.

Admitiu-se, ainda, que o telhado era composto por tijolo, uma camada de isolamento (placa de esferovite), madeira, telha, apresentando a Figura 4.2 o esquema deste.

Telha
Madeira
Ar estagnado
Placa isolante
Tijolo
Cimento

Figura 4.2- Representação esquemática do interior do telhado.

Para determinar a taxa de calor transferida através das paredes e do telhado é necessário calcular a resistência térmica total oferecida pela parede e pelo telhado à transferência de calor. Os valores da condutividade térmica e espessura dos diferentes materiais constituintes da parede e do telhado encontram-se na Tabela 4.3 (Cengel, 2002).

Tabela 4.3 - Valores de condutividade térmica e espessura dos materiais que constituem as paredes e telhado (Cengel, 2002).

<b><math>k_{\text{ar estagnado}}</math> (W/m °C)</b>	0,026
<b><math>k_{\text{tijolo}}</math> (W/m °C)</b>	0,720
<b><math>k_{\text{esforovite}}</math> (W/m °C)</b>	0,020
<b><math>k_{\text{madeira}}</math> (W/m °C)</b>	0,1136
<b><math>k_{\text{telha}}</math> (W/m °C)</b>	0,1111
<b><math>k_{\text{cimento}}</math> (W/m °C)</b>	0,0722
<b><math>e_{\text{tijolo}}</math> (m)</b>	0,160
<b><math>e_{\text{esforovite}}</math> (m)</b>	0,140
<b><math>e_{\text{madeira}}</math> (m)</b>	0,200
<b><math>e_{\text{telha}}</math> (m)</b>	0,020
<b><math>e_{\text{cimento}}</math> (m)</b>	0,005
<b><math>e_{\text{ar estagnado}}</math> (m)</b>	0,200



Na Tabela 4.4 apresentam-se os valores das resistências térmicas calculadas para cada constituinte da parede e a resistência total da mesma. No cálculo da transferência de calor pelas janelas admitiu-se que ocupavam 25 % da superfície total de uma das paredes. A equação (9) representa o modo de cálculo da resistência total da parede.

$$R_{T,p} = R_{conv,ep} + 2xR_{cond,tp} + 2xR_{cond,ep} + R_{cond,arp} + R_{conv,ip} \quad (9)$$

Tabela 4.4 - Valores das resistências térmicas de cada constituinte da parede e resistência total da mesma.

<b>Resistência a convecção externa da parede (°C/W)</b>	0,00267
<b>Resistência a convecção interna da parede (°C/W)</b>	0,00667
<b>Resistência a condução do tijolo. (°C/W)</b>	0,01482
<b>Resistência a condução do ar estagnado (°C/W)</b>	0,5128
<b>Resistência a condução do cimento (°C/W)</b>	0,00462
<b>Resistência a condução do esferovite (°C/W)</b>	0,46667
<b>Resistência total da parede (°C/W)</b>	1,494

Na Tabela 4.5 encontram-se os valores das resistências térmicas dos componentes que constituem o teto e a resistência total do mesmo. A Equação (10) representa o modo de cálculo da resistência total do telhado.

$$R_{T,t} = R_{conv,et} + R_{cond,tt} + R_{cond,et} + R_{cond,art} + R_{conv,it} + R_{cond,tet} + R_{cond,mt} \quad (10)$$

Tabela 4.5 - Valores das resistências térmicas de cada constituinte do telhado e resistência total do mesmo.

<b>Resistencia a condução da madeira (°C/W)</b>	0,0704
<b>Resistência a convecção externa (°C/W)</b>	0,0016
<b>Resistência a convecção interna (°C/W)</b>	0,004
<b>Resistência a condução do tijolo (°C/W)</b>	0,0089
<b>Resistencia a condução do ar estagnado (°C/W)</b>	0,3077
<b>Resistência a condução da telha (°C/W)</b>	0,0072
<b>Resistência a condução do cimento (°C/W)</b>	0,00277
<b>Resistência a condução do esferovite (°C/W)</b>	0,2800
<b>Resistência total do teto (°C/W)</b>	0,683

Para o cálculo da transferência da calor através das janelas, recorreu-se à equação 14, em que o coeficiente global de transferência da calor utilizado foi o proposto por Stoecker e Jones (1985), para vidro duplo com 13 mm de caixa de ar, para uma temperatura ambiente de 23 °C, durante o Verão, que tem como valor 3,2 W/(m<sup>2</sup>.K).

A potência calorífica libertada através do metabolismo basal foi determinada com base em dados tabelados do manual American Society of Heating (1997), admitindo que, em média, um indivíduo tem 1,8 m<sup>2</sup> de área.

A Equação (11) representa o modo de cálculo da potência calorífica recebida na divisão, que contribuiria para o aumento da sua temperatura.

$$\dot{Q}_T = 4x\dot{Q}_{paredes} + \dot{Q}_{telhado} + \dot{Q}_{pessoas} + \dot{Q}_{janelas} \quad (11)$$

As Equações (12), (13) e (14) representam a transferência de calor por uma das paredes, pelo telhado e pelas janelas, respetivamente.

$$\dot{Q}_{paredes} = \frac{T_e - T_i}{R_{T,p}} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{telhado} = \frac{T_e - T_i}{R_{T,t}} \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{janelas} = Ux A_{janelas} x \Delta T \quad (14)$$

Na Tabela 4.6 apresentam-se os valores obtidos para as taxas de calor transferido do exterior através das paredes, das janelas e do telhado, assim como a potência calorífica libertada devido ao metabolismo basal dos três ocupantes da divisão em causa.

Tabela 4.6 – Valores obtidos para as parcelas de calor perdido e gerado na divisão em estudo.

$\dot{Q}_T$ (W)	532,09
$\dot{Q}_{paredes}$ (W)	10,038
$\dot{Q}_{teto}$ (W)	21,976
$\dot{Q}_{pessoas}$ (W)	300 (American Society of Heating, 1997)
$\dot{Q}_{janelas}$ (W)	180

A soma das potências caloríficas calculadas, dá a indicação do valor da taxa de calor total que deve ser removido da divisão para se conseguir manter no seu interior 23 °C, quando a temperatura ambiente é de 38 °C. Este valor corresponderá à carga térmica que a unidade de refrigeração tem de remover da divisão.

Na Tabela 4.7 encontram-se os valores da potência calorífica absorvida pela divisão, com uma margem de segurança de 30%, ou seja, a potência que se irá assumir para calcular o caudal necessário de refrigerante para refrigerar a divisão será de 700 W, ao invés dos 532 W, calculados. Para este valor de potência calorífica o caudal de vapor de água vaporizado terá de ser de 2,87E-07m<sup>3</sup>/s. Com este valor determinou-se o número de colunas de refrigeração (N) em que se iria volatilizar água com

recurso à uma corrente gasosa análoga à utilizada no presente estudo necessários para a unidade de refrigeração real.

Tabela 4.7 – Valores das taxas de calor a remover da sala calculada e considerada para efeito de dimensionamento da unidade e caudal de água evaporado que será necessário.

$\dot{Q}_T$ (W), calculada	532
$\dot{Q}_T$ (W), considerado	700
$\dot{m}$ (m <sup>3</sup> /s)	2,87E-07

Sendo a unidade piloto constituída por uma coluna, que equivale a um evaporador, ao dimensionar a unidade, para os valores calculados anteriormente, existe a necessidade de determinar o número de colunas (N), ou seja, evaporadores necessários para a *scale-up*. Para tal utilizaram-se os valores das taxas de calor correspondentes ao período inicial, bem como no período estacionário dos diferentes ensaios realizados, calculadas no capítulo anterior. Na Tabela 4.8 apresentam-se os valores máximos e para o período estacionário, do caudal volumétrico ( $\dot{V}_{\text{evap}}$ , em mL/min) e da taxa de calor ( $\dot{Q}$ , em W), para as diferentes temperaturas do banho termostatzado. Os valores da taxa de calor máximo e em estado estacionário serão utilizados para o possível dimensionamento da unidade de refrigeração.

Tabela 4.8 – Caudal volumétrico e taxas de calor máxima e no período estacionário que permitem determinar o número de colunas de evaporação necessárias para manter a sala refrigerada.

		T=30 ° C		T=35 ° C		T=40 ° C	T=45 ° C	T=50 ° C	
		B1	B2	B1	B2	B1	B1	B1	B2
Período estacionário	$\dot{V}_{\text{evap}}$ (mL/min)	0,072	0,046	0,107	0,076	0,142	0,250	0,282	0,087
	$\dot{Q}$ (W)	2,87	1,85	4,30	3,05	5,69	9,91	11,04	3,42
	N	244	377	163	229	123	71	63	205
Máximo	$\dot{V}_{\text{evap}}$ (mL/min)	0,167	0,750	0,250	0,500	0,250	2,143	0,714	2,000
	$\dot{Q}$ (W)	18,65	18,65	9,30	5,01	10,04	52,48	23,99	48,33
	N	38	38	75	140	70	13	29	15

O número de colunas foi determinado com os valores das taxas de calor obtidas em cada ensaio para o período inicial do processo de refrigeração e para o período estacionário de cada ensaio. Conforme seria expectável os resultados obtidos para o

período estacionário são consideravelmente piores do que os obtidos quando se considera a transferência de calor no início do ensaio, quando a altura da coluna de água na proveta onde se volatiliza o refrigerante é maior e, simultaneamente, a solução absorvente se encontra mais concentrada. Assim, o interesse prático desta aplicação apenas seria conseguido se se mantivesse quer o evaporador quer o absorvedor com características semelhantes às observadas no início dos ensaios realizados, isto é, com uma altura de refrigerante elevada e uma solução absorvente concentrada, o que importaria um sistema em contínuo, em que fosse permanentemente adicionada água no evaporador e regenerada continuamente a solução no absorvedor

Na tabela anterior verifica-se que o número de tubos diminui com o aumento da temperatura, quer para o estado estacionário, quer para o período em que a taxa de remoção de calor é máxima.

## 5. Conclusão e Perspetivas Futuras

Com o presente trabalho pretendia-se estudar a viabilidade de uma unidade de refrigeração por absorção, com a finalidade de a aplicar em zonas de elevada exposição solar, sem acesso ou com acesso deficiente, à rede de energia elétrica.

Para o efeito foi projetada uma instalação de refrigeração usando o cloreto de lítio como solução absorvente, tendo-se realizado diversos ensaios em que se determinou a taxa de calor absorvida no processo de evaporação e, posteriormente, a taxa de calor fornecida no processo de regeneração da solução absorvente. Desta forma foi possível determinar os coeficientes de desempenho da instalação às temperaturas de 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C e 50 °C.

O estudo realizado permitiu concluir que o coeficiente de desempenho (COP) aumenta com o incremento da temperatura no evaporador, bem como com a concentração da solução de cloreto de lítio, tendo-se obtido valores para o COP de  $0,056 \pm 0,021$ ;  $0,11 \pm 0,028$ ;  $0,13 \pm 0,026$ ;  $0,32 \pm 0,071$  e  $0,28 \pm 0,054$ , respetivamente para as temperaturas no evaporador de 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C e 50 °C. Estes valores são inferiores aos apresentados na literatura que variam normalmente entre 0,6 e 0,8, mas que se referem a equipamentos que operam sob vácuo, contrariamente à instalação em estudo que funcionou à pressão atmosférica.

Numa tentativa de averiguar o potencial de utilização deste sistema aplicado ao caso real de uma divisão com três ocupantes que se pretendia refrigerar no período de verão (temperatura ambiente de 38 °C e interior de 23 °C), determinou-se o número de evaporadores análogos aos usados no estudo que permitiriam a refrigeração da divisão, pressupondo as taxas de calor removidas determinadas nos ensaios realizados a diferentes temperaturas, quer no início do processo de evaporação, quando a taxa de calor removida era máxima, quer no período estacionário que se lhe seguia. O número de evaporadores necessários determinado foi muito elevado, variando entre 13 e 377, sendo claramente inferiores quando se admitia a taxa de calor máxima removida no processo de evaporação, que correspondia ao período inicial de evaporação. Assim, pode-se concluir, que o interesse real desta aplicação apenas seria conseguido se se mantivesse quer o evaporador quer o absorvedor com características semelhantes às observadas no início dos ensaios realizados, isto é, com uma altura de refrigerante elevada e uma solução absorvente concentrada, o que imporia um sistema em contínuo em que fosse permanentemente adicionada água no evaporador e regenerada continuamente a solução no absorvedor.

## Propostas de trabalhos futuros

Este estudo pode ser melhorado, quer ao nível do aperfeiçoamento da unidade piloto, quer na forma como foram desenvolvidas as experiências.

A unidade deveria ser convertida num sistema de regeneração contínua, para maximizar a eficiência do processo, evitando que a solução de cloreto de lítio se torne-se muito diluída, tirando o máximo partido da sua capacidade máxima de absorção. Por outro lado, dever-se-ia assegurar a manutenção do nível de refrigerante no evaporador para assegurar a capacidade máxima de remoção de calor do banho termostaticado.

Seria interessante estudar o efeito do caudal da corrente gasosa sobre o processo de evaporação e absorção, por forma a potenciar a eficiência do processo.

## Referências Bibliográficas

- Afshar, O., Saidur, R., Hasanuzzaman, M., e Jameel, M. (2012). A review of thermodynamics and heat transfer in solar refrigeration system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 5639-5648.
- Ali, A. H., Noeres, P., e Pollerberg, C. (2008). Performance assessment of an integrated free cooling and solar powered single-effect lithium bromide-water absorption chiller. *Solar Energy*, 82, pp. 1021-1030.
- Al-Karaghoul, A., Abood, I., e Al-Hamdani, N. (1991). The solar energy research center building thermal performance evaluation during the summer season. *Energy Conversion and Management*, 32, pp. 409-417.
- Althouse, A. D., Turnquist, C. H., e Bracciano, A. F. (2000). *Modern refrigeration and air conditioning*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc (ASHRAE). (1997). *ASHRAE Handbook HVAC Applications*. Atlanta Georgia..
- Ara, P. J. (2010). *Desempenho de sistemas de condicionamento de ar com utilização de energia solar em edifícios de escritórios*. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo.
- Arun, M., Maiya, M., e Murthy, S. S. (2000). Equilibrium low pressure generator temperatures for double-effect series flow absorption refrigeration systems. *Applied Thermal Engineering*, 20, pp. 227 - 242.
- Balaras, C. A., Grossman, G., Henning, H.-M., Ferreira, C. A., Podesser, E., Wang, L., Wiemken, Edo. (2007). Renewable e sustainable energy reviews. *Solar air conditioning in Europe—an overview*, 11, pp. 299-314.
- Bao, H. S., Wang, R. Z., Oliveira, R. G., e Li, T. X. (2012). Resorption system for cold storage and long-distance refrigeration. *Applied Energy*, 93, pp. 479-487.
- Best, R., e Ortega, N. (1999). Solar refrigeration and cooling. *Renewable Energy*, pp. 685 - 690.
- Bong, T., Ng, K., e Tay, A. (1987). Performance study of a solar powered air conditioning system. *Solar Energy*, 39, pp. 173 - 182.
- Borge, D., Colmenar, A., Castro, M., Martín, S., e Sancristobal, E. (2011). Exergy efficiency analysis in buildings climatized with LiCl-H<sub>2</sub>O solar cooling systems that use swimming pools as heat sinks. *Energy and Buildings*, 43, pp. 3161 -3172.
- Borge-Diez, D., Colmenar-Santos, A., Perez-Molina, C., e Castro-Gil, M. (2012). Experimental validation of a fully solar-driven triple-state absorption system in small residential buildings. *Energy and Buildings*, 55, pp. 227-237.
- Çağlar, A., e Yamalı, C. (2012). Performance analysis of a solar-assisted heat pump with an evacuated tubular collector for domestic heating. *Energy and Buildings*, 54, pp. 22 - 28.
- Carvalho, E. N. (2007). *Modelagem e simulação de unidades resfriadoras de líquidos por absorção H<sub>2</sub>O-LiBr de simples e duplo efeito, incluindo o efeito de aditivos e clima local*. Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica .
- Carvalho, P. S. (2010). *Estudo aplicado de ACV a sistema de refrigeração por absorção e por compressão de vapor de amônia*. Tese de doutoramento, Escola Politécnica, São Paulo.
- Cengel, Y. A. (2002). *Heat Transfer A Practical Approach* (2 nd ed.). Hardcover.
- Cengel, Y. A., e Cimbala, J. M. (2006). *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill.

- Cengel, Y., e Boles, M. (2001). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill.
- Chan, C. W., Ling-Chin, e Roskilly, A. P. (2 de Maio de 2013). Reprint of “A review of chemical heat pumps, thermodynamic cycles and thermal energy storage technologies for low grade heat utilisation”. *Applied Thermal Engineering*, 53, pp. 160 -176.
- Conde, M. R. (2004). Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides:formulations for use in air conditioning equipment design. *International Journal of Thermal Sciences*, 43, pp. 367–382.
- D.-S Kim. (2007). *Solar Absorption Cooling*. Douturamento, University of Technology Netherlands.
- Demir, H., Mobedi, M., e Ülkü, S. (2008). A review on adsorption heat pump: Problems and solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, pp. 2381-2403.
- Enibe, S. O. (1997). Solar refrigeration for rural applications . *Renewable Energy*, 12, pp. 157-167.
- européia, P. e. (2014). REGULAMENTO (UE) N.º 517/2014 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO. *Jornal Oficial da União Europeia*, 150 - 195.
- Fan, Y., Luo, L., e Souyri, B. (Outubro de 2007). Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp. 1758-1775.
- Ferrari, F. (2005). *Optimização termodinâmica de sistemas de refrigeração solar*. Mestre em, Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia.
- Flores, V. H., Román, J. C., e Montero, G. (2014). Performance Analysis of Different Working Fluids for an Absorption Refrigeration Cycle. *American Journal of Environmental Engineering*, 4, pp. 1-10.
- Gomr, R. (2010). Investigation of the potential of application of single effect and multiple effect absorption cooling systems. *Energy Conversion and Management*, 51, pp. 1629-1636.
- Grover, G. S., Devott, S., e Holland, F. A. (1988). Thermodynamic design data for absorption heat transformers---part III. Operating on water-lithium chloride. *Heat Recovery Systems e Clip*, 8, pp. 425-431.
- Grover, G. S., Devotta, S., e Holland, F. A. (1988). Thermodynamic heat pump water-lithium design data for absorption systems operating on chloride--part II. Heating. *Heat Recovery Systems e CHP*, 8, pp. 419--423.
- Gunhan, T., Ekren, O., Demir, V., Hepbasli, A., Ereğ, A., e Sahin, A. S. (2014). Experimental exergetic performance evaluation of a novel solar assisted LiCl–H<sub>2</sub>O absorption cooling system. *Energy and Buildings*, 68, pp. 138-146.
- Hamdan, M. A., Rossides, S. D., e Khalil, R. H. (2013). Thermal energy storage using thermo-chemical heat pump. *Energy Conversion and Management*, 65, pp. 721–724.
- Hattem, D. V., e Dato, P. A. (1981). Description and performance of an active solar cooling system, using a LiBr-H<sub>2</sub>O absorption machine. *Energy and Buildings*, 3, pp. 169-196.
- Henning, H.-M. (Julho de 2007). Solar assisted air conditioning of buildings – an overview. *Applied Thermal Engineering*, 27, pp. 1734-1749.
- Höfker, G., e Eicker, U. (2001). Desiccant Cooling with Solar Energy. pp. 1 - 6.
- Horuz, I., e Callande, T. (2004). Experimental investigation of a vapor absorption refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 27, pp. 10-16.
- Jaruwongwittaya, T., e Chen, G. (2010). A review: Renewable energy with absorption chillers in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 1437–1444.
- Kaynakli, O., e Kilic, M. (2007). Theoretical study on the effect of operating conditions on performance of absorption refrigeration system. *Energy Conversion and Management*, 48, pp. 599–607.



- Kim, D. S., e Ferreira, C. A. (2008). Solar refrigeration options – a state-of-the-art review. *International Journal of Refrigeration*, 31, pp. 3 - 15.
- Li, Z. F., e Sumathy, K. (2000). Technology development in the solar absorption air-conditioning systems. 4, pp. 267 - 293.
- Li, Z., e Sumathy, K. (2001). Simulation of a solar absorption air conditioning system. *Energy Conversion and Management*, 42, pp. 231 -327.
- Lizarte, R., Izquierdo, M., Marcosc, J., e Palacios, E. (2012). An innovative solar-driven directly air-cooled LiBr–H<sub>2</sub>O absorption chiller prototype for residential use. *Energy and Buildings* 1–11, 47, pp. 1–11.
- M. A. Hamdan, S. D. (2013). Thermal energy storage using thermo-chemical heat pump. *Energy Conversion and Management*, 65, pp. 721-724.
- Marc, O., Anies, G., Lucas, F., e Castaing-Lasvignottes, J. (2012). Assessing performance and controlling operating conditions of a solar driven absorption chiller using simplified numerical models. *Solar Energy*, 86, pp. 2231 - 2239.
- Marc, O., Lucas, F., Sinama, F., e Monceyron, E. (2010). Experimental investigation of a solar cooling absorption system operating without any backup system under tropical climate. *Energy and Buildings*, 42, pp. 774–782.
- Martínez, P., e Pinazo, J. (2002). A method for design analysis of absorption machines. *International Journal of Refrigeration*, 25, pp. 634 - 639.
- Mateus, T. C. (2007). *Estudo de sistemas solares de arrefecimento usando bombas de calor de absorção*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Engenharia Mecânica e Gestão Industrial.
- N'Tsoukpoe, K., Pierrès, N. L., e Luo, L. (2012). Experimentation of a LiBr-H<sub>2</sub>O absorption process for long term solar thermal storage. *Energy Procedia*, 30, pp. 331 - 341.
- Oberweis, S., e Al-Shemmeri, T. (2012). Performance Evaluation of a Lithium-Chloride Absorption Refrigeration and an Assessment of Its Suitability for Biomass Waste Heat. *Appl. Sci.*, 2, pp. 709-725.
- Olsson, R. (2007). *Patente N.º 2007/139476*.
- Parham, K., Atikol, U., Yari, M., e Agboola, O. P. (2013). Evaluation and Optimization of Single Stage Absorption Chiller Using (LiCl + H<sub>2</sub>O) as the Working Pair. *Advances in Mechanical Engineering*, pp. 1-9.
- Parham, K., Atikol, U., Yari, M., e Agboola, O. P. (2013). Evaluation and Optimization of Single Stage Absorption Chiller Using (LiCl + H<sub>2</sub>O) as the Working Pair. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, p. 8.
- Pinel, P., Cruickshank, C. A., Beausoleil-Morrison, I., e Wills, A. (2011). A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 3341-3359.
- Praene, J. P., Marc, O., Lucas, F., e Miranvill, F. (2011). Simulation and experimental investigation of solar absorption cooling system in Reunion Island. *Applied Energy*, 88, pp. 831–839.
- Rosato, A., e Sibilio, S. (2013). Preliminary experimental characterization of a three-phase absorption heat pump. *International Journal of Refrigeration*, 36, pp. 717 - 729.
- Rosiek, S., e Batlles, F. (2009). Integration of the solar thermal energy in the construction: Analysis of the solar-assisted air-conditioning system installed in CIESOL building. *Renewable Energy*, 34, pp. 1423–1431.
- Santos, F. H. (2012). *Estudo da Aplicação de um Sistema Frigorífico de Absorção Movido a Energia Solar na Ilha do Príncipe*. Tese de Mestrado, Universidade do Algarve, Algarve.

- Santos, F. H. (2012). *Estudo da Aplicação de um Sistema Frigorífico de Absorção Movido a Energia Solar na Ilha do Príncipe*. Dissertação, Universidade do Algarve.
- Şencan, A., Yakut, K. A., e Kalogirou, S. A. (Janeiro de 2006). Thermodynamic analysis of absorption systems using artificial neural network. *Renewable Energy*, 31, pp. 29 - 43.
- Sousa, B. F. (2011). *Modelação de um sistema de refrigeração por absorção*; . Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.
- Srikhirin, P., Aphornratana, S., e Chungpaibulpatana, S. (Dezembro de 2001). A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5, pp. 343-372.
- Stoecker, W. F., e Jones, J. W. (1985). *Refrigeração e ar condicionado*. McGraw-Hill.
- Sumathy, K., Yeung, K., e Yong, L. (2003). Technology development in the solar adsorption refrigeration systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, pp. 301-327.
- Syed, A., Izquierdo, M., Rodríguez, P., Maidmentb, G., Missenden, J., Lecuonae, A., Tozer, R. . (2005). A novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid. *International Journal of Refrigeration*, 28, pp. 859–871.
- Ullah, K. R., Saidur, R., Ping, H. W., Akikur, R. K., e Shuvo, N. (2013). A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, pp. 499 - 513.
- Wang, D. C., L, Y. H., Li, D., Xia, Y. Z., e Zhang, J. P. (2010). A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 344-353.
- Wang, K., Abdelaziz, O., Kisari, P., e Vineyard, E. A. (2011). State-of-the-art review on crystallization control technologies for water/LiBr absorption heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, 34, pp. 1325-1337.
- Wang, L. W., Bao, H. S., e Wang, R. (2009). A comparison of the performances of adsorption and resorption refrigeration systems powered by the low grade heat. *Renewable Energy*, 34, pp. 2373-2379.
- Xu, L., Wang, R. Z., Li, T. X., e Wang, L. W. (2011). Experimental study on the performance of double-effect and double-way thermochemical sorption refrigeration cycle. *Applied Thermal Engineering*, 31, pp. 3658-3663.
- Yeung, M. R., Yuen, P. K., Dunn, A., e Cornish, L. S. (1992). Performance of a solar powered air conditioning system in Hong Kong. *Solar Energy*, 48, pp. 309 - 319.
- Yin, Y., Song, Z., Li, Y., Wang, R., e Zhai, X. (2012). Experimental investigation of a mini-type solar absorption cooling system under different cooling modes. *Energy and Buildings*, 47, pp. 131–138.
- Yu, N., Wang, R. Z., e Wang, L. (2013). Sorption thermal storage for solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39, pp. 489-514.
- Yu, N., Wang, R., Lu, Z., Wang, L., e Ishugah, T. (2014). Evaluation of a three-phase sorption cycle for thermal energy storage . *Energy*, 67, pp. 468-478 .
- Zambrano, D., Bordons, C., Garcia-Gabin, W., e Camacho, E. F. (2007). Model development and validation of a solar cooling plant. *International Journal of Refrigeration*.
- Zhai, X., e Wang, R. (2010). Experimental investigation and performance analysis on a solar adsorption cooling system with/without heat storage. *Applied Energy*, 87, pp. 824–835.
- Zhang, C., Yang, M., Lu, M., Shan, Y., e Zhu, J. (2011). Experimental research on LiBr refrigeration e Heat pump system applied in CCHP system. *Applied Thermal Engineering*, 31, pp. 3706-3712.
- Ziegler, F. (1999). Recent developments and future prospects of sorption heat pump systems. *International Journal of Thermal Sciences*, 38, pp. 191-208.

## Anexos

### A. Tabelas dos dados experimentais

A Tabela A.1 apresenta os valores obtidos na primeira fase dos estudos experimentais em que só se estudou o processo de evaporação, em que a temperatura do banho foi de 50 °C, que simula a temperatura ambiente da divisão.

Tabela A.1 – Resultados obtido na primeira fase de ensaio, em que só se estudou o processo de evaporação à temperatura de 50 °C.

Experiência	Data	Data	t (h)	V <sub>H2O</sub>		V <sub>LiCl</sub>		T <sub>a</sub> (°C)	$\dot{V}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}$ (W)
				inicial (mL)	final (mL)	inicial (mL)	final (mL)			
1	17/03/2014 10:03	18/03/2014 09:28	23,52	200	0	130	320	20	2,36E-09	7,27E-07
2	18/03/2014 15:52	19/03/2014 17:20	25,47	200	0	130	305	20	2,18E-09	6,71E-07
3	19/03/2014 19:52	20/03/2014 15:33	20,68	350	200	100	430	20	2,02E-09	6,20E-07
4	20/03/2014 18:00	20/03/2014 18:22	5,77	400	350	90	140	20	7,23E-09	2,22E-06
	24/03/2014 08:51	24/03/2014 14:15		350	200	140	290			
6	25/03/2014 11:32	25/03/2014 18:15	6,72	350	150	100	300	18	8,27E-09	2,54E-06
7	27/03/2014 08:58	27/03/2014 14:47	5,82	350	150	100	250	17	9,55E-09	2,94E-06
8	27/03/2014 15:03	27/03/2014 21:00	6,88	350	150	100	300	18	8,07E-09	2,48E-06
	28/03/2014 08:50	28/03/2014 09:40								
9	28/03/2014 10:00	28/03/2014 16:29	6,48	350	160	60	250	17	8,14E-09	2,50E-06
10	01/04/2014 09:47	01/04/2014 14:45	4,97	350	210	55	210	19	7,83E-09	2,41E-06
11	01/04/2014 15:03	01/04/2014 19:59	4,93					19	7,60E-09	2,34E-06
12	02/04/2014 09:30	02/04/2014 13:50	4,33	350	205	95	210	19	9,30E-09	2,86E-06
13	02/04/2014 14:02	02/04/2014 18:53	4,85	350	190	50	210	19	9,16E-09	2,82E-06
14	03/04/2014 08:50	03/04/2014 14:03	6,88	350	180	120	290	19	6,86E-09	2,11E-06
15	03/04/2014 14:33	03/04/2014 18:43	4,17	360	220	90	230	19	9,33E-09	2,87E-06
16	04/04/2014 10:36	04/04/2014 16:16	6,33	350	200	90	240	19	6,58E-09	2,02E-06
17	08/04/2014 10:44	08/04/2014 16:26	5,17	350	200	105	255	23	8,07E-09	2,48E-06
18	09/04/2014 09:28	09/04/2014 14:32	5	355	195	90	250	21	8,89E-09	2,73E-06
19	09/04/2014 14:57	09/04/2014 19:58	4,98	350	220	60	190	23	7,25E-09	2,23E-06
20	10/04/2014 09:19	10/04/2014 14:45	6,07	350	200	80	230	21	6,87E-09	2,11E-06
21	10/04/2014 14:56	10/04/2014 19:31	4,58	355	250	70	175	21	6,36E-09	1,96E-06
22	11/04/2014 08:50	11/04/2014 14:31	5,68	355	205	100	250	22	7,33E-09	2,26E-06
23	14/04/2014 09:15	14/04/2014 14:54	6,15	350	200	110	260	22	6,78E-09	2,08E-06
24	15/04/2014 08:08	15/04/2014 12:30	4,63	350	210	80	220	22	8,39E-09	2,58E-06
25	15/04/2014 12:42	15/04/2014 17:50	5,13	350	215	105	240	22	7,31E-09	2,25E-06

As propriedades da água foram obtidas através de (Cengel, et al., 2006)

Tabela A.2 – Condições usadas na experiência 1, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 5,28 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>Data</b>	29/abr
<b>T<sub>a</sub> (° C)</b>	23
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	5,68
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,77
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	30,53
<b>T<sub>evap</sub> (° C)</b>	50
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2382,70
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	988,0
<b>T<sub>reg</sub> (°C)</b>	94,40
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2372,14
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1025,49
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,46
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,54
<b>ρ<sub>água</sub>(T=96 °C) (kg/m<sup>3</sup>) à T de Reg</b>	961,9
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) reg</b>	1020,79
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.3 – Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 1, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 5,28 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	V <sup>Prov</sup> <sub>H<sub>2</sub>O</sub> (mL)	V <sup>Prov</sup> <sub>LiCl</sub> (mL)	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,ac</sub> (mL)	$\dot{V}_{H_2O,med}^{Evap} \times 10^1$ (L/min)	$\dot{V}_{H_2O,ins}^{Evap}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		355	135	0			5,68
20	10	350	140	5	2,500	0,250	5,48
40	30	340	150	15	3,750	0,500	5,12
60	50	335	155	20	3,333	0,250	4,95
80	70	330	160	25	3,125	0,250	4,80
100	90	320	170	35	3,500	0,500	4,51
120	110	315	175	40	3,333	0,250	4,38
140	130	310	180	45	3,214	0,250	4,26
160	150	305	185	50	3,125	0,250	4,15
180	170	300	190	55	3,056	0,250	4,04
200	190	295	195	60	3,000	0,250	3,93
220	210	290	200	65	2,955	0,250	3,84
240	230	285	205	70	2,917	0,250	3,74
260	250	280	210	75	2,885	0,250	3,65
280	270	275	215	80	2,857	0,250	3,57
300	290	270	220	85	2,833	0,250	3,49
330	315	260	230	95	2,879	0,333	3,34
360	345	255	235	100	2,778	0,167	3,26
390	375	245	245	110	2,821	0,333	3,13
420	405	240	250	115	2,738	0,167	3,07
450	435	235	255	120	2,667	0,167	3,01
480	465	230	260	125	2,604	0,167	2,95
510	495	225	265	130	2,549	0,167	2,90
540	525	210	280	145	2,685	0,500	2,74

Tabela A.4 – Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 1, com uma concentração de 5.28 M e para uma temperatura de 50 °C em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min..

	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,T</sub> (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	145	4,475	10,54	0,244
Máximo		8,333	19,62	0,454

Tabela A.5 – Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 1, com uma concentração de 5.28 M e para uma temperatura de 50 °C em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>T (°C)</b>	<b><math>V_{LiCl}^{Prov}</math> (mL)</b>	<b><math>C_{LiCl}</math> (M)</b>	<b><math>x_{LiCl}</math> (m/m)</b>	<b><math>\Delta t</math> (h)</b>
90	280	2,740	0,1162	6,58
	235	3,265	0,1384	
94	230	3,336	0,1414	7,22
	190	4,038	0,1712	
96	185	4,147	0,1758	8,00
	135	5,480	0,2323	

Tabela A.6 – Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 1, com uma concentração de 5.28 M e para uma temperatura de 50°C em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b><math>V_{H_2O}^{Evap}</math> (mL)</b>	<b><math>\dot{V}_{H_2O}^{Evap}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b><math>\dot{m}</math> (kg/h)</b>	<b><math>\dot{m}</math> (kg/s)</b>	<b><math>\dot{Q}_{reg}</math> (W)</b>
1308	145	1,85	6,82	1,89	4,22

Tabela A.7 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b><math>\Theta</math></b>	0,568
<b><math>\pi</math></b>	0,856
<b><math>f(x,T)</math></b>	1,000
<b>A</b>	0,986
<b>B</b>	0,024
<b><math>\pi_{25}</math></b>	0,856
<b>T</b>	0,432
<b><math>\rho_{h_2o}(T)</math></b>	962,5
<b><math>x/1-x</math></b>	0,131
	0,240
<b><math>\Delta h_{d,0}</math></b>	429,1
<b><math>\Delta h_d</math></b>	104,4

Tabela A.8 - Condições usadas na experiência 2, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,88 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>Data</b>	30/abr
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	22
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	12,79
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,77
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	32,53
<b>T<sub>evap</sub> (°C)</b>	50,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2382,70
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	988,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	96,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2678,73
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	963,29
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,54
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,32
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>) à T de Reg</b>	963,29
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1102,88
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.9 – Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 2, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,88 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b>t<sub>m</sub> (min)</b>	<b>V<sub>H2O</sub><sup>Prov</sup> (mL)</b>	<b>V<sub>LiCl</sub><sup>Prov</sup> (mL)</b>	<b>V<sub>H2O,ac</sub><sup>Evap</sup> (mL)</b>	<b><math>\dot{V}_{H2O,med}^{Evap} \times 10^3</math> (L/min)</b>	<b><math>\dot{V}_{H2O,ins}^{Evap}</math> (L/min)</b>	<b>C<sub>LiCl</sub> (M)</b>
0		390	60	0			12,79
10	5	370	80	20	2,00	2,00	9,59
30	20	360	90	30	1,00	0,50	8,53
50	40	355	95	35	0,700	0,25	8,08
188	119	350	100	40	0,213	0,04	7,67
281	235	345	105	45	0,160	0,05	7,31
322	302	340	110	50	0,131	0,12	6,98
371	347	335	115	55	0,128	0,10	6,67
392	382	330	120	60	0,133	0,24	6,39
477	435	325	125	65	0,121	0,06	6,14

Tabela A.10 - – Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 2, com uma concentração de 11,88 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	65	2,271	5,35	0,116
Máximo		33,33	78,47	1,699

Tabela A.11– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 2, com uma concentração de 11,88 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
96	125	6,138	0,260	16:24
	60	12,788	0,542	19:12

Tabela A.12 – Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 2, com uma concentração de 11,88 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
389	65	2,785E-09	1,117E-02	3,104E-06	7,19



---

Tabela A.13 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min..

<b><math>\Theta</math></b>	0,57
<b><math>\pi</math></b>	0,59
<b><math>f(x,T)</math></b>	1,16
<b>A</b>	0,61
<b>B</b>	0,97
<b><math>\pi_{25}</math></b>	0,50
<b><math>\tau</math></b>	0,43
<b><math>\rho_{h2o}(T)</math></b>	961,39
	0,77
<b><math>\Delta h_{d,0}</math></b>	430,21
<b><math>\Delta h_d</math></b>	402,68

Tabela A.14 - Condições usadas na experiência 3, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,18 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 45 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>Data</b>	26/mai
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	22
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	11,18
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	45
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2394,80
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	995,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2294,21
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,47
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,53
<b>P<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>) a T de Reg</b>	961,50
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1034,58
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.15 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 3, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,18 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 45 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	V <sup>Prov</sup> <sub>H<sub>2</sub>O</sub> (mL)	V <sup>Prov</sup> <sub>LiCl</sub> (mL)	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,ac</sub> (mL)	$\dot{V}_{H_2O,med}^{Evap} \times 10^3$ (L/min)	$\dot{V}_{H_2O,ins}^{Evap}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		405	70				11,18
20	10	400	75	5	0,25	4,17	10,43
40	30	395	80	10	0,25	4,17	9,78
70	55	390	90	15	0,17	3,57	8,69
90	80	385	95	20	0,25	3,70	8,24
110	100	380	100	25	0,25	3,79	7,82
132	121	370	105	35	0,45	4,42	7,45
152	142	365	110	40	0,25	4,39	7,11
172	162	360	115	45	0,25	4,36	6,80
192	182	355	120	50	0,25	4,34	6,52
212	202	345	130	60	0,50	4,72	6,02
232	222	340	135	65	0,25	4,67	5,80
262	247	335	140	70	0,17	4,45	5,59
292	277	325	150	80	0,33	4,57	5,22
352	322	295	180	110	0,50	5,21	4,35
387	370	285	190	120	0,29	5,17	4,12
422	405	275	200	130	0,29	5,13	3,91
462	442	265	210	140	0,25	5,05	3,73

Tabela A.16– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 3, com uma concentração de 11,18 M e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,T</sub> (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	140	5,05	12,03	0,266
Máximo		8,33	12,86	0,439

Tabela A.17– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 3, com uma concentração de 11,18 M e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>T (°C)</b>	<b><math>V_{LiCl}^{Prov}</math> (mL)</b>	<b><math>C_{LiCl}</math> (M)</b>	<b><math>x_{LiCl}</math> (m/m)</b>	<b><math>\Delta t</math> (h)</b>
96	215	3,639	0,1543	7,87
	130	6,018	0,255	
	115	6,803	0,288	7,63
	50	15,648	0,6634	

Tabela A.18– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 3, com uma concentração de 11,18 M e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b><math>V_{H_2O}^{Evap}</math> (mL)</b>	<b><math>\dot{V}_{H_2O}^{Evap}</math> (m³/s)</b>	<b><math>\dot{m}</math> (kg/s)</b>	<b><math>\dot{Q}_{Reg}</math> (W)</b>
930	165	2,96	1,07E-14	6,52

Tabela A.19 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b><math>\Theta</math></b>	0,57
<b><math>\pi</math></b>	0,83
<b><math>f(x,T)</math></b>	1,00
<b>A</b>	0,98
<b>B</b>	0,05
<b><math>\pi_{25}</math></b>	0,83
<b>T</b>	0,43
<b><math>\rho_{H_2O}(T)</math></b>	962,08
<b><math>x/1-x</math></b>	0,15
	0,28
<b><math>\Delta h_{d,0}</math></b>	429,51
<b><math>\Delta h_d</math></b>	24,01

Tabela A.20 - Condições usadas na experiência 4, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,04 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>Data</b>	03/jun
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	24
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	12,04
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	50
<b>λ<sub>H<sub>2</sub>O</sub> (kJ/Kg)</b>	2394,80
<b>ρ<sub>H<sub>2</sub>O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	995,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	96
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2466,63
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	958,00
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,51
<b>x<sub>H<sub>2</sub>O</sub> (m/m)</b>	0,49
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1008,43
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.21 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 4, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,04 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min..

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	$V_{H_2O}^{Prov}$ (ml)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$V_{H_2O,ac}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O,med}^{Evap} \times 10^4$ (L/min)	$\dot{V}_{H_2O,ins}^{Evap}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		455	65	0			12,04
30	15	435	85	20	6,67	0,67	9,20
50	40	425	95	30	6,00	0,50	8,24
72	61	415	105	40	5,56	0,45	7,45
92	82	410	110	45	4,89	0,25	7,11
112	102	400	120	55	4,91	0,50	6,52
133	123	390	130	65	4,89	0,48	6,02
175	154	375	145	80	4,57	0,36	5,40
196	186	360	160	95	4,85	0,71	4,89
216	206	350	170	105	4,86	0,50	4,60
236	226	345	175	110	4,66	0,25	4,47
360	298	310	210	145	4,03	0,28	3,73
380	370	305	215	150	3,95	0,25	3,64
400	390	300	220	155	3,88	0,25	3,56
425	413	290	230	165	3,88	0,40	3,40
442	434	285	235	170	3,85	0,29	3,33
462	452	280	240	175	3,79	0,25	3,26
523	493	260	260	195	3,73	0,33	3,01
583	553	245	275	210	3,60	0,25	2,85

Tabela A.22– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 4, com uma concentração de 12.04 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	210	6,00	14,31	0,308
Máximo		11,9	28,37	0,611

Tabela A.23– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 4, com uma concentração de 12,04 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min..

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	275	2,85	0,121	4,88
	230	3,40	0,144	
	215	3,64	0,154	7,87
	130	6,02	0,255	
	115	6,80	0,288	5,88
	65	12,04	0,510	

Tabela A.24– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 4, com uma concentração de 12,04 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m³/s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
1118	210	3,13E-09	1,184E-04	5,62E-08	7,40

Tabela A.25 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

$\Theta$	0,584
$\pi$	0,893
$f(x,T)$	0,999
$A$	0,995
$B$	0,008
$\pi_{25}$	0,894
$\tau$	0,416
$\rho_{H_2O}(\tau)$	954,918
$x/1-x$	0,103
	0,252
$\Delta h_{d,0}$	436,579
$\Delta h_d$	209,632

Tabela A.26 - Condições usadas na experiência 5, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 16,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>Data</b>	02/jun
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	25
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	15,65
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	30
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2430,50
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	996,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	96,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2337,83
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	960,80
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,66
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,34
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) carga</b>	1089,87
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.27 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 5, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b>t<sub>m</sub> (min)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>H2O</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>LiCl</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H2O,ac</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H2O,med</sub> x 10<sup>3</sup> (L/min)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H2O,ins</sub> (L/min)</b>	<b>[LiCl] M</b>
0		405	50	0		15,65	15,65
35	18	400	55	5	1,43	14,23	14,23
81	58	395	60	10	1,24	13,04	13,04
140	110	390	65	15	1,07	12,04	12,04
261	200	385	70	20	0,77	11,18	11,18
363	312	380	80	25	0,69	9,78	9,78
454	408	375	85	30	0,66	9,20	9,20
693	573	360	100	45	0,65	7,82	7,82
1315	1004	335	125	70	0,53	6,26	6,26
1407	1361	330	130	75	0,53	6,02	6,02
1563	1485	325	135	80	0,51	5,80	5,80
1625	1594	315	145	90	0,55	5,40	5,40
1789	1707	305	155	100	0,56	5,05	5,05
1863	1826	300	160	105	0,56	4,89	4,89



Tabela A.28– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 5, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	105	0,94	2,27	0,054
Máximo		2,38	5,76	0,136

Tabela A.29– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 5, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
96	160	5,22	0,221	1,38
	145	5,40	0,229	
	140	5,59	0,237	9,57
	115	6,80	0,288	
	110	7,11	0,302	2,72
	100	7,82	0,332	
	100	7,82	0,332	5,42
	60	15,65	0,663	

Tabela A.30– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 5, com uma concentração de 15.65 M e para uma temperatura de 30°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 358 ± 8,6 l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
1145	100	1,456E-09	5,67E-03	1,574E-06	3,28

---

Tabela A.31 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

$\Theta$	0,570
$\pi$	0,700
$f(x,T)$	1,061
$A$	0,843
$B$	0,382
$\pi_{25}$	0,660
$T$	0,430
$\rho_{H_2O}(T)$	961,388
$x/1-x$	0,262
	0,528
$\Delta h_{d,0}$	430,213
$\Delta h_d$	70,274

Tabela A.32 - Condições usadas na experiência 6, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 45 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>Data</b>	16/jun
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	27
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	772
<b>Concentração (M)</b>	14,23
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,7824
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	45
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2394,8
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	995
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2282,88
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	958
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,6031
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,3969
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) RERegg</b>	1037,53
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.33 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 6, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 45°C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 l/min.

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	V <sup>Prov</sup> <sub>H<sub>2</sub>O</sub> (mL)	V <sup>Prov</sup> <sub>LiCl</sub> (mL)	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,ac</sub> (mL)	$\dot{V}^{Evap}_{H_2O,med} \times 10^3$ (L/min)	$\dot{V}^{Evap}_{H_2O,ins}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		405	55	0			14,23
21	11	360	100	45	2,14	2,14	7,82
40	31	350	110	55	1,38	0,53	7,11
60	50	340	120	65	1,08	0,50	6,52
80	70	325	135	80	1,00	0,75	5,80
100	90	310	150	95	0,95	0,75	5,22
120	110	300	160	105	0,88	0,50	4,89
140	130	290	170	115	0,82	0,50	4,60
160	150	280	180	125	0,78	0,50	4,35
256	208	260	200	145	0,57	0,21	3,91
276	266	255	205	150	0,54	0,25	3,82
296	286	250	210	155	0,52	0,25	3,73
316	306	245	215	160	0,51	0,25	3,64
382	349	240	220	165	0,43	0,08	3,56
402	392	235	225	170	0,42	0,25	3,48
423	413	230	230	175	0,41	0,24	3,40

Tabela A.34– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 6, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 l/min.

	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,T</sub> (mL)	$\dot{V}^{Evap}_{H_2O} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	175	6,895	16,43	0,366
Máximo		35,71	85,10	1,893

Tabela A.35– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 6, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	230	3,40	0,144	2,37
	215	3,64	0,154	
	215	3,64	0,154	7,87
	130	6,02	0,255	
	115	6,80	0,288	7,63
	55	14,23	0,603	

Tabela A.36– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 6, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 45 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$Q_{reg}$ (W)
1072	175	2,72E-09	1,016E-02	2,823E-06	5,95

Tabela A.37 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

$\Theta$	0,57
$\pi$	0,81
$f(x,T)$	1,01
A	0,97
B	0,07
$\pi_{25}$	0,81
T	0,43
	0,32
$\Delta h_{d,0}$	429,51
$\Delta h_d$	25,88

Tabela A.38 - Condições usadas na experiência 7, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 8,24 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>.Data</b>	19/mai
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	8,24
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,7824
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,169
<b>T<sub>Evaporação</sub> (°C)</b>	50
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2270,2
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,5
<b>T<sub>Regeneraçãp</sub> (°C)</b>	95
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2385,02
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,5
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,35
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,65
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) carga</b>	1 071,80
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.39 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 7, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 8,24 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 50 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>.t (min)</b>	<b>t<sub>m</sub> (min)</b>	<b>V<sub>H2O</sub><sup>Prov</sup> (mL)</b>	<b>V<sub>LiCl</sub><sup>Prov</sup> (mL)</b>	<b>V<sub>H2O,ac</sub><sup>Evap</sup> (mL)</b>	<b>ṽ<sub>H2O,med</sub><sup>Evap</sup> x10<sup>4</sup> (L/min)</b>	<b>ṽ<sub>H2O,ins</sub><sup>Evap</sup> (L/min)</b>	<b>C<sub>LiCl</sub> (M)</b>
0		0	400	0			8,24
20	10	20	395	5	2,50	0,25	7,82
40	30	40	385	15	3,75	0,50	6,80
61	51	61	380	20	3,28	0,24	6,52
81	71	81	375	25	3,09	0,25	6,26
107	94	107	370	30	2,80	0,19	6,02
157	132	157	365	35	2,23	0,10	5,80
207	182	207	360	40	1,93	0,10	5,59
260	234	260	355	45	1,73	0,09	5,40
310	285	310	350	50	1,61	0,10	5,22
394	352	394	345	55	1,40	0,06	5,05
454	424	454	340	60	1,32	0,08	4,89
514	484	514	335	65	1,26	0,08	4,74
573	544	573	330	70	1,22	0,08	4,60

Tabela A.40– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 7, com uma concentração de 8,24 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$V_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{Evap}$ (W)	COP
Médio	70	2,03	4,44	0,103
Máximo		8,33	18,19	0,421

Tabela A.41– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 7, com uma concentração de 8,24 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	170	4,60	0,195	7,60
	115	6,80	0,288	
	110	7,11	0,302	3,80
	95	8,24	0,349	

Tabela A.42– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 7, com uma concentração de 8,24 M e para uma temperatura de 50 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$Q_{reg}$ (W)
684	75	1,83E-09	7,051E-03	1,959E-06	4,19

Tabela A.43 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

$\Theta$	0,569
$\pi$	0,723
$f(x,T)$	1,044
$A$	0,878
$B$	0,292
$\pi_{25}$	0,692
$T$	0,431
$\rho_{h_2o}(T)$	962,084
$x/1-x$	0,242
	0,482
$\Delta h_{d,0}$	429,506
$\Delta h_d$	114,822

---



Tabela A.44 - Condições usadas na experiência 8, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 10,43 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>.Data</b>	11/set
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	25
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	770
<b>Concentração (M)</b>	10,43
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	35,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (Kj/Kg)</b>	2418,60
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	994,00
<b>T<sub>Reg</sub></b>	96,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (Kj/Kg)</b>	2484,59
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	960,80
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,44
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,56
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1039,74
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.45 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 8, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 10,43 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	$V_{H_2O}^{Prov}$ (mL)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$V_{H_2O,ac}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O,med}^{Evap} \times 10^4$ (L/min)	$\dot{V}_{H_2O,ins}^{Evap}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		420	75	0			10,43
20	10	415	80	5	2,50	0,25	9,78
40	30	410	85	10	2,50	0,25	9,20
80	60	405	90	15	1,88	0,13	8,69
120	100	400	95	20	1,67	0,13	8,24
185	153	395	100	25	1,35	0,08	7,82
220	203	390	105	30	1,36	0,14	7,45
260	240	385	110	35	1,35	0,13	7,11
280	270	380	115	40	1,43	0,25	6,80
320	300	375	120	45	1,41	0,13	6,52
360	340	370	125	50	1,39	0,13	6,26
440	400	360	135	60	1,36	0,13	5,80
480	460	355	140	65	1,35	0,13	5,59
520	500	350	145	70	1,35	0,13	5,40
560	540	345	150	75	1,34	0,13	5,22
1467	1014	235	230	185	1,26	0,12	3,40
1591	1529	225	240	195	1,23	0,08	3,26

Tabela A.46– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 8, com uma concentração de 10,45 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	195	2,0427	4,91	0,118
Máximo		4,17	10,017	0,240

Tabela A.47– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 8, com uma concentração de 10,45 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
96	240	3,26	0,1382	9,93
	140	5,59	0,2369	
	140	5,59	0,2369	
	95	8,24	0,3491	9,80
	90	8,70	0,3686	
	65	12,04	0,5103	10,68
	60	13,04	0,5528	
	75	10,43	0,4422	10,78

Tabela A.48– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 8, com uma concentração de 10,45 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
2472	165	1,1125E-9	4,1640E-03	0,17156	2,66

Tabela A.49 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

$\Theta$	0,570
$\pi$	0,821
$f(x,T)$	1,004
$A$	0,971
$B$	0,056
$\pi_{25}$	0,818
$\tau$	0,430
$\rho_{h_2o}(\tau)$	961,388
$x/1-x$	0,160
	0,299
$\Delta h_{d,0}$	430,213
$\Delta h_d$	217,025

Tabela A.50 - Condições usadas na experiência 9, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 40 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>.Data</b>	15/set
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	28,00
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	770,00
<b>Concentração</b>	14,23
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	40,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (Kj/Kg)</b>	2430,50
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	996,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (Kj/Kg)</b>	2680,04
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,60
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,40
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1115,83
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.51 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 9, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 40 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	V <sup>Prov</sup> <sub>H<sub>2</sub>O</sub> (mL)	V <sup>Prov</sup> <sub>LiCl</sub> (mL)	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,ac</sub> (mL)	$\dot{V}^{Evap}_{H_2O,med} \times 10^4$ (L/min)	$\dot{V}^{Evap}_{H_2O,ins}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		405	55	0			14,23
30	15	400	60	5	1,67	0,167	13,04
60	45	395	65	10	1,67	0,167	13,04
80	70	390	70	15	1,88	0,250	12,04
110	95	385	75	20	1,82	0,167	11,18
140	125	380	80	25	1,79	0,167	10,43
180	160	375	85	30	1,67	0,125	9,78
220	200	370	90	35	1,59	0,125	9,20
300	260	355	105	50	1,67	0,188	8,69
340	320	350	110	55	1,62	0,125	7,45
380	360	345	115	60	1,58	0,125	7,11
420	400	340	120	65	1,55	0,125	6,80
460	440	330	130	75	1,63	0,250	6,02

Tabela A.52– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 9, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 40°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $400 \pm 7,4$  l/min.

	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,T</sub> (mL)	$\dot{V}^{Evap}_{H_2O} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	75	2,7174	6,578	0,150
Máximo		4,17	10,09	0,230

Tabela A.53– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 9, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 40°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

T (°C)	V <sup>Prov</sup> <sub>LiCl</sub> (mL)	C <sub>LiCl</sub> (M)	x <sub>LiCl</sub> (m/m)	Δt (h)
95	130	6,02	0,2654	9,40
	65	12,04	0,5103	
	60	13,04	0,5528	1,82
	55	14,23	0,6031	

---

Tabela A.54– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 9, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 40 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b><math>V_{H_2O}^{Evap}</math> (mL)</b>	<b><math>\dot{V}_{H_2O}^{Evap}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b><math>\dot{m}</math> (kg/h)</b>	<b><math>\dot{m}</math> (kg/s)</b>	<b><math>\dot{Q}_{reg}</math> (W)</b>
673	75	1,8574E-09	1,236E-04	3,43392E-08	4,78

Tabela A.55 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>Θ</b>	0,569
<b>Π</b>	0,598
<b>f(x,T)</b>	1,150
<b>A</b>	0,639
<b>B</b>	0,898
<b>Π<sub>25</sub></b>	0,520
<b>τ</b>	0,431
<b>ρ<sub>h2o</sub>(τ)</b>	962,084
<b>x/1-x</b>	0,343
	0,740
<b>Δh<sub>d,0</sub></b>	429,506
<b>Δh<sub>d</sub></b>	409,838

Tabela A.56 - Condições usadas na experiência 10, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,96 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>.Data</b>	16/set
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	26
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	763
<b>Concentração (M)</b>	13,95
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,77
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,53
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	35
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2418,6
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	994
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2697,49
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,5
<b>X<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,59
<b>X<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,49
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1052,66
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39



Tabela A.57 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 10, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,96 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	$V_{H_2O}^{Prov}$ (mL)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$V_{H_2O,ac}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O,med}^{Evap} \times 10^4$ (L/min)	$\dot{V}_{H_2O,ins}^{Evap}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		400	55	0			13,95
20	10	395	60	5	2,500	0,250	12,79
40	30	390	65	10	2,500	0,250	11,80
60	50	385	70	15	2,500	0,250	10,96
100	80	380	75	20	2,000	0,125	10,23
140	120	375	80	25	1,786	0,125	9,59
180	160	370	85	30	1,667	0,125	9,03
220	200	365	90	35	1,591	0,125	8,53
270	245	360	95	40	1,481	0,100	8,08
334	302	355	100	45	1,347	0,078	7,67
394	364	350	105	50	1,269	0,083	7,31
454	424	345	110	55	1,211	0,083	6,98
514	484	340	115	60	1,167	0,083	6,67
574	544	335	120	65	1,132	0,083	6,39
1414	994	270	185	130	0,919	0,077	4,15

Tabela A.58– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 10, com uma concentração de 12,96 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	130	1,53	3,68	0,079
Máximo		4,17	10,07	0,214

Tabela A.59– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 10, com uma concentração de 12,96 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>T (°C)</b>	<b><math>V_{LiCl}^{Prov}</math> (mL)</b>	<b><math>C_{LiCl}</math> (M)</b>	<b><math>x_{LiCl}</math> (m/m)</b>	<b><math>\Delta t</math> (h)</b>
95	185	4,15	0,176	8,73
	80	9,59	0,407	
	70	10,96	0,465	3,23
	55	13,95	0,591	

Tabela A.60– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 10, com uma concentração de 12,96 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b><math>V_{H_2O}^{Evap}</math> (mL)</b>	<b><math>V_{H_2O}^{Evap}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b><math>\dot{m}</math> (kg/h)</b>	<b><math>\dot{m}</math> (kg/s)</b>	<b><math>Q_{reg}</math> (W)</b>
718	130	3,02E-09	1,919E-04	5,332E-08	7,83

Tabela A.61 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b><math>\Theta</math></b>	0,569
<b><math>\pi</math></b>	0,758
<b><math>f(x,T)</math></b>	1,024
<b>A</b>	0,921
<b>B</b>	0,181
<b><math>\pi_{25}</math></b>	0,740
<b><math>\tau</math></b>	0,431
<b><math>\rho_{H_2O}(\tau)</math></b>	962,084
<b><math>x/1-x</math></b>	0,213
	0,414
<b><math>\Delta h_{d,0}</math></b>	429,506
<b><math>\Delta h_d</math></b>	427,294

Tabela A.62 - Condições usadas na experiência 11, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35°C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>.Data</b>	17/set
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	26
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	15,65
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,7824
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	35
<b>λ<sub>H2O</sub> (Kj/Kg)</b>	2418,6
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	994
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95
<b>λ<sub>LiCl</sub> (Kj/Kg)</b>	2321,37
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,5
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,66
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,34
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg/</b>	1049,43
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.63 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 11, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	V <sup>Prov</sup> <sub>H<sub>2</sub>O</sub> (mL)	V <sup>Prov</sup> <sub>LiCl</sub> (mL)	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,ac</sub> (mL)	$\dot{V}^{Evap}_{H_2O,med} \times 10^4$ (L/min)	$\dot{V}^{Evap}_{H_2O,ins}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		400	50	0			15,65
20	10	390	60	10	5,000	0,500	13,04
40	30	385	65	15	3,750	0,250	12,04
80	60	380	70	20	2,500	0,125	11,18
120	100	375	75	25	2,083	0,125	10,43
160	140	370	80	30	1,875	0,125	9,78
220	190	365	85	35	1,591	0,083	9,20
280	250	360	90	40	1,429	0,083	8,69
320	300	355	95	45	1,406	0,125	8,24
390	355	350	100	50	1,282	0,071	7,82
450	420	345	105	55	1,222	0,083	7,45
510	480	340	110	60	1,176	0,083	7,11
1281	896	280	170	120	0,937	0,078	4,60
1356	1319	275	175	125	0,922	0,067	4,47
1403	1380	270	180	130	0,927	0,106	4,35
1480	1442	265	185	135	0,912	0,065	4,23
1542	1511	260	190	140	0,908	0,081	4,12
1662	1602	250	200	150	0,903	0,083	3,91
1745	1704	245	205	155	0,888	0,060	3,82
1835	1790	235	210	165	0,899	0,111	3,73

Tabela A.64– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 11, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,T</sub> (mL)	$\dot{V}^{Evap}_{H_2O} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	165	1,41	3,60	0,078
Máximo		8,33	20,03	0,436

Tabela A.65 – Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 11, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>T (°C)</b>	<b><math>V_{LiCl}^{Prov}</math> (mL)</b>	<b><math>C_{LiCl}</math> (M)</b>	<b><math>x_{LiCl}</math> (m/m)</b>	<b><math>\Delta t</math> (h)</b>
95	210	3,73	0,158	6,53
	130	6,02	0,255	
	115	6,80	0,288	7,63
	50	15,65	0,663	

Tabela A.66– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 11, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b><math>V_{H_2O}^{Evap}</math> (mL)</b>	<b><math>\dot{V}_{H_2O}^{Evap}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b><math>\dot{m}</math> (kg/h)</b>	<b><math>\dot{m}</math> (kg/s)</b>	<b><math>\dot{Q}_{reg}</math> (W)</b>
850	160	3,137E-09	1,185E-02	3,292E-06	7,00

Tabela A.67 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b><math>\Theta</math></b>	0,569
<b><math>\pi</math></b>	0,788
<b><math>f(x,T)</math></b>	1,011
<b>A</b>	0,950
<b>B</b>	0,108
<b><math>\pi_{25}</math></b>	0,779
<b>T</b>	0,431
<b><math>\rho_{h_2o}(T)</math></b>	962,084
<b><math>x/1-x</math></b>	0,188
	0,357
<b><math>\Delta h_{d,0}</math></b>	429,506
<b><math>\Delta h_d</math></b>	51,174

Tabela A.68 - Condições usadas na experiência 12, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 40°C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>.Data</b>	29/set
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	27,00
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	774,00
<b>Concentração (M)</b>	14,23
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evaporação</sub> (°C)</b>	40,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2418,60
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	992,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2654,44
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,60
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,40
<b>P<sub>H2O,35</sub></b>	994,00
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.69 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 12, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 40°C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 l/min.

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	V <sup>Prov</sup> <sub>H<sub>2</sub>O</sub> (mL)	V <sup>Prov</sup> <sub>LiCl</sub> (mL)	T <sub>LiCl</sub> (°C)	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,ac</sub> (mL)	$\dot{V}_{H_2O,med}^{Evap} \times 10^4$ (L/min)	$\dot{V}_{H_2O,ins}^{Evap}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		400	55	24	0			14,23
20	10	395	60	40	5	2,50	0,25	13,04
40	30	390	65	45	10	2,50	0,25	12,04
60	50	385	70	45	15	2,50	0,25	11,18
80	70	380	75	44	20	2,50	0,25	10,43
100	90	380	75	43	20	2,50	0,25	10,43
120	110	375	80		25	2,50	0,25	9,78
150	135	370	85	41	30	2,33	0,17	9,20
180	165	365	90	40	35	2,22	0,17	8,69
324	252	340	115		60	1,85	0,14	6,80
979	652	245	210		155	1,58	0,15	3,73
1402	1191	195	260		205	1,46	0,12	3,01
1479	1441	190	265		210	1,42	0,06	2,95
1856	1668	140	315		260	1,40	0,13	2,48

Tabela A.70– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 12, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 40°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de 402 ± 6,2 l/min.

	V <sup>Evap</sup> <sub>H<sub>2</sub>O,T</sub> (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	260	2,33	5,60	0,113
Máximo		4,17	10,00	0,202

Tabela A.71– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 12, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 40°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	330	2,37	0,1005	8,70
	205	3,82	0,1618	
	185	4,23	0,1792	9,92
	100	7,82	0,3317	
	95	8,24	0,3492	7,20
	65	14,23	0,6031	
	60	13,04	0,5528	4,83
	55	14,23	0,6030	

Tabela A.72– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 12, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 40°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m³/s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
1117	275	4,10E-09	2,502E-04	6,65E-06	10,47

Tabela A.73 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

$\Theta$	0,569
$\pi$	0,882
$f(x,T)$	0,999
$A$	0,993
$B$	0,011
$\pi_{25}$	0,882
$\tau$	0,431
$\rho_{H_2O}(\tau)$	962,084
$x/1-x$	0,112
	0,201
$\Delta h_{d,0}$	429,506
$\Delta h_d$	384,238



Tabela A.74 - Condições usadas na experiência 13, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30°C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>Data</b>	10/out
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	24
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	15,35
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,77
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	32,53
<b>T<sub>Evaporação</sub> (°C)</b>	30,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2418,60
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	996,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2476,14
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,65053593
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,34946407
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1068,03
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.75 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 13, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b>t<sub>m</sub> (min)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>H2O</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>LiCl</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H2O,ac</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H2O,med</sub> x10<sup>4</sup> (L/min)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H2O,ins</sub> (L/min)</b>	<b>C<sub>LiCl</sub> (M)</b>	<b>T<sub>LiCl</sub> (°C)</b>
0		400	50	0			15,35	24
20	10	385	65	15	7,50	0,75	11,80	34
45	33	380	70	20	4,44	0,20	10,96	33
90	68	375	75	25	2,78	0,11	10,23	31
155	123	365	85	35	2,26	0,15	9,03	30
215	185	360	90	40	1,86	0,08	8,53	30
404	310	355	95	45	1,11	0,03	8,08	30
522	463	350	100	50	0,96	0,04	7,67	30
582	552	345	105	55	0,95	0,08	7,31	30
1601	1092	305	145	95	0,59	0,04	5,29	28
1736	1669	300	150	100	0,58	0,04	5,12	28
1847	1792	295	155	105	0,57	0,05	4,95	28
1922	1885	290	160	110	0,57	0,07	4,80	28

Tabela A.76– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 13, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 6,2$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	110	0,95	2,30	0,051
Máximo		12,5	30,11	0,664

Tabela A.77– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 13, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 30°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 6,2$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	160	4,80	0,2033	5,42
	90	8,53	0,3614	
	80	9,59	0,4066	6,02
	50	15,35	0,6505	

Tabela A.78– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 13, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 6,8$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
686	110	2,67E-09	1,727E-04	4,796E-08	6,36

---

Tabela A.79 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 6,2$  l/min.

<b><math>\Theta</math></b>	0,569
<b><math>\pi</math></b>	0,707
<b><math>f(x,T)</math></b>	1,055
<b>A</b>	0,855
<b>B</b>	0,351
<b><math>\pi_{25}</math></b>	0,671
<b><math>\tau</math></b>	0,431
<b><math>\rho_{h_2O}(\tau)</math></b>	962,084
<b><math>x/1-x</math></b>	0,255
	0,512
<b><math>\Delta h_{d,0}</math></b>	429,506
<b><math>\Delta h_d</math></b>	205,944

Tabela A.80 - Condições usadas na experiência 14, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 6,2$  l/min.

<b>.Data</b>	20/out
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	22
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	15,65
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evaporação</sub> (°C)</b>	30,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2418,60
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	996,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2523,23
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,66
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,34
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1079,28
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.81 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 14, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 6,2$  l/min..

<b>t (min)</b>	<b>t<sub>m</sub> (min)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>H2O</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>LiCl</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H2O,ac</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H2O,med</sub> x10<sup>4</sup> (L/min)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H2O,ins</sub> (L/min)</b>	<b>T<sub>LiCl</sub> (°C)</b>	<b>C<sub>LiCl</sub> (M)</b>
0		410	50	0			21	15,65
20	10	400	60	10	5,00	0,50	31	13,04
40	30	395	65	15	3,75	0,25	31	12,04
90	65	390	70	20	2,22	0,10	31	11,18
140	115	385	75	25	1,79	0,10	31	10,43
190	165	380	80	30	1,58	0,10	31	9,78
250	220	375	85	35	1,40	0,08	30	9,20
336	293	370	90	40	1,19	0,06	30	8,69
421	379	365	95	45	1,07	0,06	29	8,24
504	463	360	100	50	0,99	0,06	29	7,82
595	550	355	105	55	0,92	0,05	28	7,45
1572	1084	305	155	105	0,67	0,05	26	5,05
1919	1746	300	160	110	0,57	0,01		4,89

Tabela A.82– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 14, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 6,2$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	110	0,955	2,3014	0,052
Máximo		8,33	20,07	0,458

Tabela A.83– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 14, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 6,2$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	160	4,89	0,207	9,00
	80	9,78	0,4147	
	80	9,78	0,4146	6,23
	50	15,65	0,6633	

Tabela A.84– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 14, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
914	110	2,01E-09	1,299E-04	3,608E-08	4,87

---

Tabela A.85 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

$\Theta$	0,569
$\pi$	0,700
$f(x,T)$	1,061
$A$	0,843
$B$	0,382
$\pi_{25}$	0,660
$\tau$	0,431
$\rho_{H_2O}(\tau)$	962,084
$x/1-x$	0,262
	0,528
$\Delta h_{d,0}$	429,506
$\Delta h_d$	253,034

Tabela A.86- Condições usadas na experiência 15, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 8,69 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente em que se utilizou uma bomba de ar com um caudal de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>Data</b>	10/nov
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	24
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	8,69
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub></b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	30,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2418,60
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	996,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2270,96
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,37
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,63
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1049,43
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.87 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 15, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 8,69 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 30 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b>t<sub>m</sub> (min)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>LiCl</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H<sub>2</sub>O,ac</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H<sub>2</sub>O,med</sub> x10<sup>4</sup> (L/min)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H<sub>2</sub>O,ins</sub> (L/min)</b>	<b>T<sub>LiCl</sub> (°C)</b>	<b>C<sub>LiCl</sub> (M)</b>	<b>t (min)</b>
0		405	90	0			24	0	8,69
30	15	400	95	5	0,17	0,17	33	5	8,24
85	58	395	100	10	1,18	0,09	35	10	7,82
150	118	390	105	15	1,00	0,08	35	15	7,45
210	180	385	110	20	0,95	0,08	34	20	7,11
270	240	380	115	25	0,93	0,08	34	25	6,80
330	300	375	120	30	0,91	0,08	34	30	6,52
390	360	370	125	35	0,90	0,08	34	35	6,26
450	420	365	130	40	0,89	0,08	32	40	6,02
510	480	360	135	45	0,88	0,08		45	5,80
1506	1008	290	205	115	0,76	0,07	26	115	3,82
1583	1545	285	210	120	0,76	0,06	26	120	3,73
1656	1620	280	215	125	0,75	0,07	26	125	3,64
1774	1715	275	220	130	0,73	0,04	26	130	3,56

Tabela A.88– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 15, com uma concentração de 8,69 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$V_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{Evap}$ (W)	COP
Médio	130	1,22E-09	2,94	0,067
Máximo		2,78E-09	6,69	0,153

Tabela A.89 – Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 15, com uma concentração de 8,69 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	220	3,56	0,1508	2,57
	190	4,12	0,1746	
	180	4,35	0,1843	2,10
	165	4,74	0,2010	
	155	5,05	0,2140	1,13
	145	5,40	0,2288	
	135,5	5,77	0,2448	7,25
	130	6,02	0,2551	
	125	6,26	0,2654	
	115	6,80	0,2884	
	110	7,11	0,3015	
	105	7,45	0,3159	
	100	7,82	0,3317	3,83
	100	7,82	0,3317	
	90	8,69	0,3685	

Tabela A.90– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 15, com uma concentração de 8,69 M e para uma temperatura de 30 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$Q_{reg}$ (W)
1013	130	1,97E-09	1,34E-04	3,726E-08	4,67



---

Tabela A.91 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

$\Theta$	0,569
$\pi$	0,800
$f(x,T)$	1,008
$A$	0,959
$B$	0,087
$\pi_{25}$	0,794
$\tau$	0,431
$\rho_{H_2O}(T)$	962,084
$x/1-x$	0,178
	0,336
$\Delta h_{d,0}$	429,506
$\Delta h_d$	0,738

Tabela A.92 - Condições usadas na experiência 16, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>.Data</b>	12/nov
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	19
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	15,35
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,77
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	32,53
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	35,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2750,69
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	994,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2602,29
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,65
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,35
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1054,70
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.93 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 16, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b>t<sub>m</sub> (min)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>LiCl</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H<sub>2</sub>O,ac</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H<sub>2</sub>O,med</sub> x 10<sup>4</sup> (L/min)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H<sub>2</sub>O,ins</sub> (L/min)</b>	<b>T<sub>LiCl</sub> (°C)</b>	<b>C<sub>LiCl</sub> (M)</b>
0		360	50	0			19	15,35
50	25	355	55	5	1,00	0,100	34	13,95
80	65	350	60	10	1,25	0,167		12,79
115	98	345	65	15	1,30	0,143		11,80
160	138	340	70	20	1,25	0,111	36	10,96
195	178	335	75	25	1,28	0,143	36	10,23
235	215	330	80	30	1,28	0,125	36	9,59
277	256	325	85	35	1,26	0,119	36	9,03
327	302	320	90	40	1,22	0,100		8,53
379	353	315	95	45	1,19	0,096		8,08
419	399	310	100	50	1,19	0,125	32	7,67
469	444	305	105	55	1,17	0,100		7,31

Tabela A.94– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 16, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	160	1,82E-09	4,98	0,095
Máximo		2,98E-09	7,16	0,155

Tabela A.95– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 16, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	210	3,65	0,1549	7,60
	155	4,95	0,2099	
	135	5,68	0,2409	
	120	6,39	0,2711	
	110	6,98	0,2957	3,12
	90	8,53	0,3614	
	80	9,59	0,4066	3,70
	70	10,96	0,4647	
	65	11,80	0,5004	
	60	12,79	0,5421	

Tabela A.96– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 16, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
865	150	2,89E-09	1,817E-04	5,046E-08	5,74

---

Tabela A.97 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

$\Theta$	0,569
$\pi$	0,793
$f(x,T)$	1,010
$A$	0,954
$B$	0,099
$\pi_{25}$	0,786
$T$	0,431
$\rho_{H_2O}(T)$	962,084
$x/1-x$	0,183
	0,348
$\Delta h_{d,0}$	429,506
$\Delta h_d$	331,854

Tabela A.98 - Condições usadas na experiência 17, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35°C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>.Data</b>	12/nov
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	18,00
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760,00
<b>Concentração (M)</b>	14,23
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Eva</sub> (°C)</b>	35,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2418,60
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	994,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2275,47
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>X<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,60
<b>X<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,40
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1045,18
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.99 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 17, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 14,23 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b>t<sub>m</sub> (min)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>H2O</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>LiCl</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Eva</sup><sub>H2O,ac</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Eva</sup><sub>H2O,med</sub> x10<sup>4</sup> (L/min)</b>	<b>V<sup>Eva</sup><sub>H2O,ins</sub> (L/min)</b>	<b>T<sub>LiCl</sub> (°C)</b>	<b>C<sub>LiCl</sub> (M)</b>
0		350	55	0			18	14,23
30	15	345	60	5	1,67	0,167	34	13,04
65	48	340	65	10	1,54	0,143	34	12,04
90	78	335	70	15	1,67	0,200	34	11,18
131	111	330	75	20	1,53	0,122	34	10,43
170	151	325	80	25	1,47	0,128	34	9,78
243	207	317	85	33	1,36	0,110	34	9,20
261	252	315	90	35	1,34	0,111	34	8,69
292	277	310	95	40	1,37	0,161	34	8,24
345	319	305	100	45	1,30	0,094	29	7,82
440	393	295	110	55	1,25	0,105	28	7,11
475	458	290	115	60	1,26	0,143	28	6,80
510	493	285	120	65	1,27	0,143	28	6,52
1580	1045	180	225	170	1,08	0,098	25	3,48

Tabela A.100– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 17, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$V_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{Evap}$ (W)	COP
Médio	170	1,79E-09	4,31	0,098
Máximo		3,33E-09	8,01	0,182

Tabela A.101– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 17, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	225	3,48	0,1474	12,15
	205	3,82	0,1618	
	200	3,91	0,1658	8,17
	190	4,12	0,1746	
	185	4,23	0,1793	
	135	5,80	0,2457	
	120	6,52	0,2764	
	115	6,80	0,2884	
	100	7,82	0,3317	
	60	13,04	0,5528	
	55	14,23	0,6031	1,13
	55	14,23	0,6031	
	50	15,65	0,6634	

Tabela A.102– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 17, com uma concentração de 14,23 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$Q_{reg}$ (W)
1219	170	2,32E-09	8,73E-03	2,42E-06	5,09

---

Tabela A.103 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

$\Theta$	0,569
$\pi$	0,806
$f(x,T)$	1,007
$A$	0,962
$B$	0,077
$\pi_{25}$	0,800
$\tau$	0,431
$\rho_{H_2O}(\tau)$	962,084
$x/1-x$	0,173
	0,326
$\Delta h_{d,0}$	429,506
$\Delta h_d$	5,262

Tabela A.104 - Condições usadas na experiência 18, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>.Data</b>	17/nov
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	19,00
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	15,35
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,77
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	32,53
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	35,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2418,60
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	994,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2277,75
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,65053593
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,34946407
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1052,66
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.105 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 18, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,35 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b>t<sub>m</sub> (min)</b>	<b>V<sub>H2O</sub><sup>Prov</sup> (mL)</b>	<b>V<sub>LiCl</sub><sup>Prov</sup> (mL)</b>	<b>V<sub>H2O,ac</sub><sup>Evap</sup> (mL)</b>	<b><math>\dot{V}_{H2O,med}^{Evap} \times 10^4</math> (L/min)</b>	<b><math>\dot{V}_{H2O,ins}^{Evap}</math> (L/min)</b>	<b>C<sub>LiCl</sub> (M)</b>
0		305	50	0			15,35
20	10	300	55	5	2,50	0,25	13,95
50	35	295	60	10	2,00	0,17	12,79
90	70	290	65	15	1,67	0,13	11,80
140	115	285	70	20	1,43	0,10	10,96
190	165	280	75	25	1,32	0,10	10,23
240	215	275	80	30	1,25	0,10	9,59
290	265	270	85	35	1,21	0,10	9,03
347	319	265	90	40	1,15	0,09	8,53
410	379	260	95	45	1,10	0,08	8,08
470	440	255	100	50	1,06	0,08	7,67
1513	992	155	200	150	0,99	0,10	3,84



Tabela A.106– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 18, com uma concentração de 14,26 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	150	1,65E-09	3,97	0,089
Máximo		4,17E-09	10,01	0,224

Tabela A.107– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 18, com uma concentração de 14,26 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 8,6$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	200	3,84	0,1626	9,48
	135	5,68	0,2409	
	120	6,39	0,2711	6,42
	95	8,08	0,3424	
	90	8,53	0,3614	
	85	9,03	0,3827	
	55	13,95	0,5914	
	50	15,35	0,6505	

Tabela A.108– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 18, com uma concentração de 15,35 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 8,6$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
954	150	2,62E-09	1,654E-04	4,596E-08	5,74

---

Tabela A.109 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

$\Theta$	0,569
$\pi$	0,780
$f(x,T)$	1,014
$A$	0,943
$B$	0,125
$\pi_{25}$	0,770
$\tau$	0,431
$\rho_{H_2O}(\tau)$	962,084
$x/1-x$	0,194
	0,372
$\Delta h_{d,0}$	429,506
$\Delta h_d$	7,372

Tabela A.110 - Condições usadas na experiência 19, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,18 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>.Data</b>	19/nov
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	18,00
<b>P<sub>a</sub>(mmHg)</b>	
<b>Concentração (M)</b>	11,18
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	35,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2422,59
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	994,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2273,40
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>x<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,47
<b>x<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,53
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1041,32
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	60,00

Tabela A.111 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 19, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 11,18 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min..

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	$V_{H_2O}^{Prov}$ (mL)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$V_{H_2O,ac}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O,med}^{Evap} \times 10^4$ (L/min)	$\dot{V}_{H_2O,ins}^{Evap}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		350	70	0			11,18
20	10	345	75	5	2,500	0,250	10,43
40	30	340	80	10	2,500	0,250	9,78
80	60	335	85	15	1,875	0,125	9,20
115	98	330	90	20	1,739	0,143	8,69
151	133	325	95	25	1,656	0,139	8,24
192	172	320	100	30	1,563	0,122	7,82
220	206	315	105	35	1,591	0,179	7,45
250	235	310	110	40	1,600	0,167	7,11
300	275	305	115	45	1,500	0,100	6,80
335	318	300	120	50	1,493	0,143	6,52
392	364	295	125	55	1,403	0,088	6,26
422	407	290	130	60	1,422	0,167	6,02
465	444	285	135	65	1,398	0,116	5,80
510	488	280	140	70	1,373	0,111	5,59
1422	966	180	240	170	1,195	0,110	3,40

Tabela A.112– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 19, com uma concentração de 11,18 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	170	1,99E-09	4,79	0,111
Máximo		4,17E-09	10,02	0,233

Tabela A.113– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 19, com uma concentração de 11,18 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $400 \pm 7,4$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	240	3,26	0,1382	8,62
	205	3,82	0,1618	
	200	3,91	0,1658	
	190	4,12	0,1746	
	165	4,74	0,2010	
	155	5,05	0,2140	
	145	5,40	0,2288	8,22
	140	5,59	0,2369	
	130	6,02	0,2551	
	115	6,80	0,2884	
	100	7,82	0,3317	
	100	7,82	0,3317	8,77
	95	8,24	0,3491	
	80	9,78	0,4146	
	75	10,43	0,4423	
	70	11,18	0,4738	

Tabela A.114– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 19, com uma concentração de 11,18 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
1536	170	1,84E-09	1,15E-04	3,19E-08	4,03

---

Tabela A.115 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $402 \pm 6,2$  l/min.

$\Theta$	0,569
$\pi$	0,821
$f(x,T)$	1,004
$A$	0,971
$B$	0,056
$\pi_{25}$	0,818
$\tau$	0,431
$\rho_{H_2O}(\tau)$	962,084
$x/1-x$	0,160
	0,299
$\Delta h_{d,0}$	429,506
$\Delta h_d$	3,209

Tabela A.116 - Condições usadas na experiência 20, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>.Data</b>	2/nov
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	15,65
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	35,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2424,95
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	994,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2276,55
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>X<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,66
<b>X<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,34
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1049,43
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.117 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 20, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b>t<sub>m</sub> (min)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>LiCl</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H<sub>2</sub>O,ac</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H<sub>2</sub>O,med</sub> × 10<sup>4</sup> (L/min)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H<sub>2</sub>O,ins</sub> (L/min)</b>	<b>C<sub>LiCl</sub> (M)</b>
0		300	50	0			15,65
20	10	295	55	5	2,50	0,25	14,23
40	30	290	60	10	2,50	0,25	13,04
81	60,5	285	65	15	1,85	0,12	12,04
121	101	280	70	20	1,65	0,13	11,18
171	146	275	75	25	1,46	0,10	10,43
231	201	270	80	30	1,30	0,08	9,78
301	266	265	90	40	1,33	0,07	8,69
391	346	250	100	50	1,28	0,17	7,82
451	421	245	105	55	1,22	0,08	7,45
511	481	240	110	60	1,17	0,08	7,11
1575	1043	140	210	160	1,02	0,09	3,73

Tabela A.118– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 20, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$V_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{Evap}$ (W)	COP
Médio	160	1,693E-09	4,08	0,091
Máximo		4,167E-09	10,02	0,224

Tabela A.119– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 20, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	210	3,73	0,1579	8,60
	175	4,47	0,1895	
	160	4,89	0,2073	
	120	6,52	0,2764	4,25
	115	6,80	0,2884	
	105	7,45	0,3159	8,47
	70	11,18	0,4738	
	65	12,04	0,5103	
	60	13,04	0,5528	
	50	15,65	0,6634	

Tabela A.120– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 20, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35 °C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$Q_{reg}$ (W)
1024	160	2,604E-09	1,640E-04	4,555E-08	5,70



---

Tabela A.121 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b><math>\theta</math></b>	0,569
<b><math>\pi</math></b>	0,788
<b><math>f(x,T)</math></b>	1,011
<b>A</b>	0,950
<b>B</b>	0,108
<b><math>\pi_{25}</math></b>	0,779
<b><math>\tau</math></b>	0,431
<b><math>\rho_{H_2O}(\tau)</math></b>	962,084
<b><math>x/1-x</math></b>	0,188
	0,357
<b><math>\Delta h_{d,0}</math></b>	429,506
<b><math>\Delta h_d</math></b>	6,351

Tabela A.122 - Condições usadas na experiência 21, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 17,05 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>.Data</b>	25/nov
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	20
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	17,05
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,77
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	32,53
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	35,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2418,60
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	994,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2270,20
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>X<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,7228177
<b>X<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,2771823
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1064,56
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.123 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 21, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 17,05 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>t (min)</b>	<b>t<sub>m</sub> (min)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>H2O</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Prov</sup><sub>LiCl</sub> (mL)</b>	<b>V<sup>Evap</sup><sub>H2O,ac</sub> (mL)</b>	<b><math>\dot{V}^{Evap}_{H2O,med} \times 10^4</math> (L/min)</b>	<b><math>\dot{V}^{Evap}_{H2O,ins}</math> (L/min)</b>	<b>C<sub>LiCl</sub> (M)</b>
0		315	45	0			17,05
30	15	310	50	5	1,67	0,17	15,35
70	50	305	55	10	1,43	0,13	13,95
100	85	300	60	15	1,50	0,17	12,79
140	120	295	65	20	1,43	0,13	11,80
200	170	290	70	25	1,25	0,08	10,96
260	230	285	75	30	1,15	0,08	10,23
320	290	280	80	35	1,09	0,08	9,59
382	351	275	85	40	1,05	0,08	9,03
441	412	270	90	45	1,02	0,08	8,53
500	471	265	95	50	1,00	0,08	8,08
560	530	260	100	55	0,98	0,08	7,67
1465	1013	205	155	110	0,75	0,06	4,95

Tabela A.124– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 21, com uma concentração de 17,05 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	315	3,584E-09	8,62	0,187
Máximo		2,778E-09	6,68	0,145

Tabela A.125– Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 21, com uma concentração de 17,05 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	175	4,38	0,1859	8,08
	145	5,29	0,2243	
	130	5,90	0,2502	
	120	6,39	0,2711	3,00
	110	6,98	0,2957	
	105	7,31	0,3098	
	100	7,67	0,3253	
	85	9,03	0,3827	
	80	9,59	0,4066	
	75	10,23	0,4337	
	65	11,80	0,5004	
	60	12,79	0,5421	
	55	13,95	0,5914	
	45	17,05	0,7228	

Tabela A.126– Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 21, com uma concentração de 17,05 M e para uma temperatura de 35°C utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

.t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
655	130	3,26E-09	2,084E-04	5,790E-08	7,11

Tabela A.127 – Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio utilizando uma bomba com caudal volumétrico de  $358 \pm 8,6$  l/min.

$\Theta$	0,569
$\pi$	0,740
$f(x,T)$	1,033
$A$	0,900
$B$	0,234
$\pi_{25}$	0,716
$\tau$	0,431
$\rho h_{2o}(\tau)$	962,084
$x/1-x$	0,228
	0,449
$\Delta h_{d,0}$	429,506
$\Delta h_d$	14,476

Tabela A.128 - Condições usadas na experiência 22, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,04 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de  $358 \pm 8,6$  l/min.

<b>.Data</b>	27/nov
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	18
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	12,04
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	35,00
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2418,60
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	994,00
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95,00
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2270,20
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,50
<b>X<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,59
<b>X<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,51
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1037,80
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.129 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 22, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 12,02 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de  $358 \pm 8,6$  l/min.

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	$V_{H_2O}^{Prov}$ (mL)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$V_{H_2O,ac}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O,med}^{Evap} \times 10^4$ (L/min)	$\dot{V}_{H_2O,ins}^{Evap}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		310	65	0			12,04
20	10	305	70	5	2,50	0,250	11,18
40	30	300	75	10	2,50	0,250	10,43
70	55	295	80	15	2,14	0,167	9,78
110	90	290	85	20	1,82	0,125	9,20
150	130	285	90	25	1,67	0,125	8,69
190	170	280	95	30	1,58	0,125	8,24
230	210	275	100	35	1,52	0,125	7,82
285	257,5	270	105	40	1,40	0,091	7,45
334	309,5	265	110	45	1,35	0,102	7,11
377	355,5	260	115	50	1,33	0,116	6,80
420	398,5	255	120	55	1,31	0,116	6,52
480	450	250	125	60	1,25	0,083	6,26
877	678,5	215	160	95	1,08	0,088	4,89
1599	1238	155	220	155	0,97	0,083	3,56
1659	1629	150	225	160	0,96	0,083	3,48
1719	1689	145	230	165	0,96	0,083	3,40

Tabela A.130- Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 22, com uma concentração de 12,04 M e para uma temperatura de 35 °C em que se utilizou com um caudal de  $358 \pm 8,6$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	165	1,66E-09	3,99	0,099
Máximo		4,17E-09	10,02	0,249

Tabela A.131 - Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 22, com uma concentração de 12,04 M e para uma temperatura de 35 °C em que se utilizou com um caudal de  $358 \pm 8,6$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	240	3,26	0,1382	8,62
	205	3,82	0,1618	
	200	3,91	0,1658	
	190	4,12	0,1746	
	165	4,74	0,2010	
	155	5,05	0,2140	
	145	5,40	0,2288	8,22
	140	5,59	0,2369	
	130	6,02	0,2551	
	115	6,80	0,2884	
	100	7,82	0,3317	
	100	7,82	0,3317	8,77
	95	8,24	0,3491	
	80	9,78	0,4146	
	75	10,43	0,4423	
	70	11,18	0,4738	

Tabela A.132 - Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 22, com uma concentração de 12,04 M e para uma temperatura de 35°C em que se utilizou com um caudal de  $458 \pm 8,6$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
1536	50	5,425E-10	3,378E-05	9,384E-09	1,18

---

Tabela A.133 - Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio em que se utilizou com um caudal de  $358 \pm 8,6$  l/min.

$\theta$	0,569
$\pi$	0,821
$f(x,T)$	1,004
A	0,971
B	0,056
$\pi_{25}$	0,818
$\tau$	0,431
$\rho_{H_2O}(\tau)$	962,084
$x/1-x$	0,160



Tabela A.134 - Condições usadas na experiência 23, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min.

<b>.Data</b>	27/nov
<b>T<sub>a</sub> (°C)</b>	18
<b>P<sub>a</sub> (mmHg)</b>	760
<b>Concentração (M)</b>	15,65
<b>n<sub>LiCl</sub> (mol)</b>	0,78
<b>m<sub>LiCl</sub> (g)</b>	33,17
<b>T<sub>Evap</sub> (°C)</b>	35
<b>λ<sub>H2O</sub> (kJ/Kg)</b>	2418,60
<b>ρ<sub>H2O</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	994,0
<b>T<sub>Reg</sub> (°C)</b>	95
<b>λ<sub>LiCl</sub> (kJ/Kg)</b>	2280,76
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	961,5
<b>X<sub>LiCl</sub> (m/m)</b>	0,66
<b>X<sub>H2O</sub> (m/m)</b>	0,33
<b>ρ<sub>LiCl</sub> (x,T) Reg</b>	1037,80
<b>P<sub>B</sub> (W)</b>	39

Tabela A.135 - Resultados experimentais obtidos durante o processo de evaporação da experiência 23, correspondente a uma concentração de cloreto de lítio de 15,65 M na solução absorvente inicial e para uma temperatura de 35 °C na fonte quente em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	t <sub>m</sub> (min)	$V_{H_2O}^{Prov}$ (mL)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$V_{H_2O,ac}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O,med}^{Evap} \times 10^4$ (L/min)	$\dot{V}_{H_2O,ins}^{Evap}$ (L/min)	C <sub>LiCl</sub> (M)
0		305	50	0			15,65
30	15	300	55	5	1,67	0,167	14,23
105	68	295	60	10	0,95	0,067	13,04
120	113	290	65	15	1,25	0,333	12,04
185	153	285	70	20	1,08	0,077	11,18
270	228	280	75	25	0,93	0,059	10,43
355	313	275	80	30	0,85	0,059	9,78
400	378	270	85	35	0,88	0,111	9,20
430	415	265	90	40	0,93	0,167	8,69
455	443	260	95	45	0,99	0,200	8,24
870	663	225	130	80	0,92	0,084	6,02
1608	1239	170	185	135	0,84	0,075	4,23
1624	1616	165	190	140	0,86	0,313	4,12

Tabela A.136 - Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de evaporação da experiência 23, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35 °C em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min.

	$V_{H_2O,T}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap} \times 10^9$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{Q}_{Evap}$ (W)	COP
Médio	140	1,437E-09	3,45	0,074
Máximo		5,556E-09	13,36	0,288

Tabela A.137 - Dados experimentais do processo de regeneração da experiência 23, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35 °C em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min.

T (°C)	$V_{LiCl}^{Prov}$ (mL)	$C_{LiCl}$ (M)	$x_{LiCl}$ (m/m)	$\Delta t$ (h)
95	190	4,12	0,1746	2,98
	180	4,35	0,1843	
	155	5,05	0,2140	
	145	5,40	0,2288	
	130	6,02	0,2551	5,88
	105	7,45	0,3159	
	95	8,24	0,3491	
	90	8,69	0,3685	
	85	9,20	0,3902	
	75	10,43	0,4423	
	70	11,18	0,4738	2,60
	60	13,04	0,5528	
	50	15,65	0,6634	

Tabela A.138 - Valores obtidos a partir dos dados experimentais do processo de regeneração da experiência 23, com uma concentração de 15,65 M e para uma temperatura de 35°C em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min.

t (min)	$V_{H_2O}^{Evap}$ (mL)	$\dot{V}_{H_2O}^{Evap}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/h)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}_{reg}$ (W)
688	140	3,391E-09	2,156E-04	5,988E-08	7,40

---

Tabela A.139 - Parâmetros necessários para o cálculo das propriedades do cloreto de lítio em que se utilizou com um caudal de  $402 \pm 6,2$  l/min.

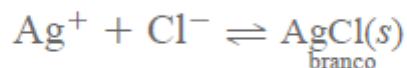
$\theta$	0,569
$\pi$	0,760
$f(x,T)$	1,023
A	0,923
B	0,175
$\pi_{25}$	0,743
$\tau$	0,431
$\rho_{h_2O}(\tau)$	962,084
$x/1-x$	0,211
	0,410
$\Delta h_{d,0}$	429,506
$\Delta h_d$	10,561

---

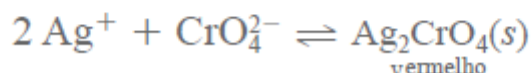
## B. Protocolo Método de Mohr

◀ O método de **Mohr** para cloreto.

Reação de titulação



Reação do indicador



### i. Preparação da solução de Nitrato de prata

#### Material

- Balança
- Vidro de relógio
- Estufa
- Espátula
- excicador
- Funil
- Balão de diluição
- Papel de alumínio
- Esguicho de água destilado
- Nitrato de prata~

#### Metodologia

Numa balança de precisão pese a massa de nitrato de prata, para obter uma solução de  $0,1 \text{ mol l}^{-1}$ . Após a pesagem coloque na estufa durante aproximadamente uma hora, passado esse tempo, retire da estufa e coloque a arrefecer no excicador. Quando o nitrato de prata estiver frio, pese novamente, a pesagem deve ser feita até o peso estabilizar. Com a ajuda de um funil coloque o nitrato de prata no balão de diluição e com o esguicho de água destilada lave muito bem o vidro do relógio, perfaça o balão de diluição até ao volume desejado.

No fim de feita a diluição, o balão que contem a solução, deve ser envolto em papel de alumínio e guardado em local escuro.

---

## **ii. Preparação da solução de cromato de potássio**

### **Material**

- Balança
- Vidro de relógio
- Espátula
- Funil
- Balão de diluição
- Esguicho de água destilado
- Cromato de potássio

### **Metodologia**

Numa balança de precisão pese a massa de cromato de potássio e dilua-a em água destilada, com a massa e o volume desejado de modo a obter uma concentração de 0,1 mmol/L. Com o auxílio do funil verta o cromato de potássio para o balão e lave muito bem o vidro do relógio, perfaça o balão até ao volume pretendido.

## **iii. Método de Mohr**

### **Material**

- Pipeta
- Bureta
- Espátula
- Pera de sucção
- Balão de diluição
- Esguicho de água destilado
- Agitador magnético
- Magneto
- Matraz
- Suporte
- Solução de cromato de potássio
- Solução de nitrato de prata
- Noz
- Garra
- Solução diluída de cloreto de lítio

### **Metodologia**

Com a pipeta retire uma amostra da solução diluída de cloreto de lítio, e dilua num balão com a água destilada. Repita este procedimento cinco vezes. Depois de ter feito as amostras, coloque-as num matraz e junte o magneto, coloque em agitação na placa e adicione um mililitro da solução de cromato de potássio.

Lave a bureta com nitrato de prata e encha-o com nitrato de prata, coloque a bureta no suporte e inicie a titulação, sempre com agitação, a titulação termina quando a solução a analisar apresentar uma cor de tijolo.

Todo o material deve ser muito bem lavado com água destilada.